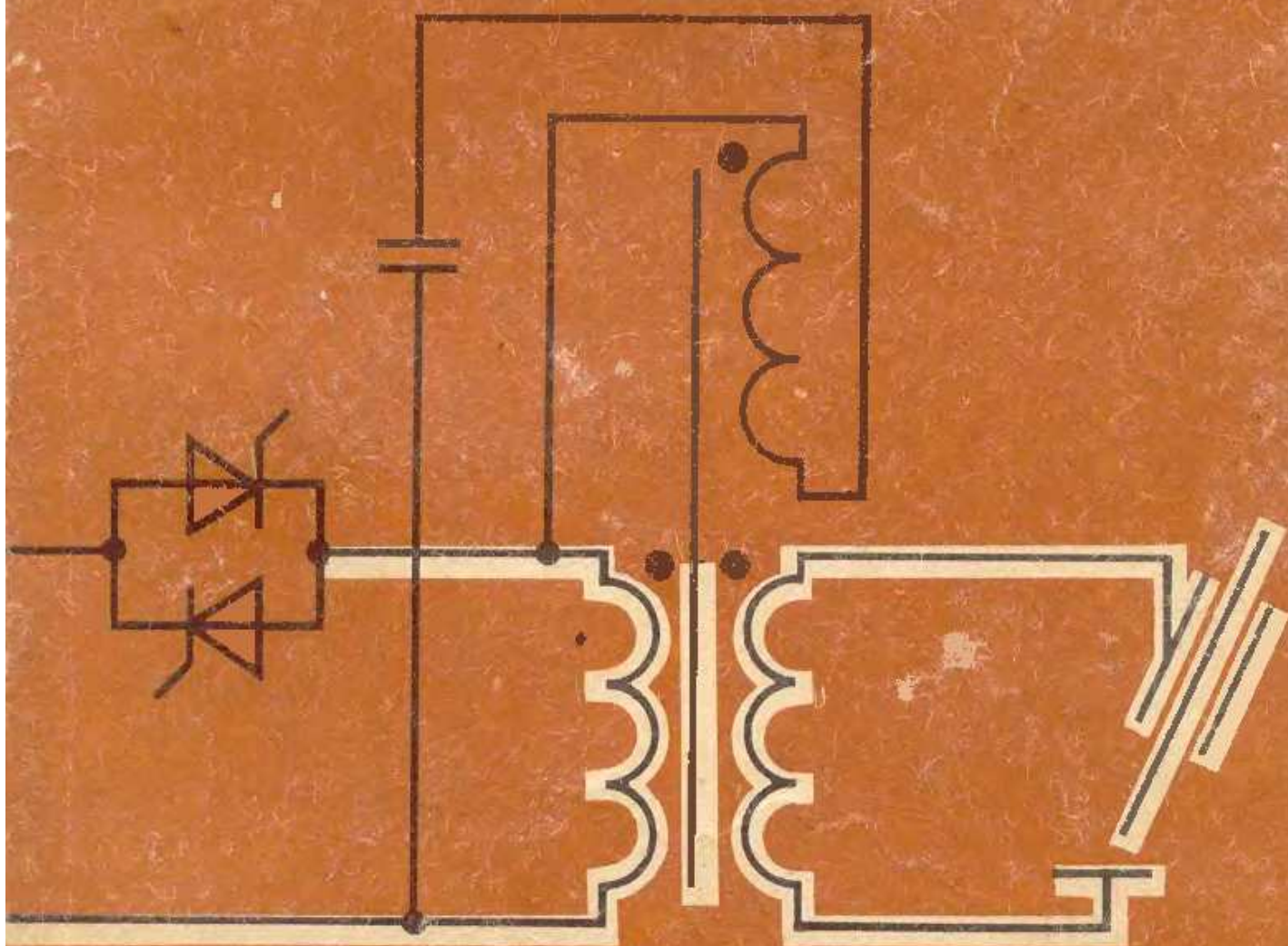


М. И. ЗАКС, Б. А. КАГАНСКИЙ, А. А. ПЕЧЕНИН



# ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ



ЭЛЕКТРО-  
СВАРОЧНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ

---

М. И. ЗАКС  
Б. А. КАГАНСКИЙ  
А. А. ПЕЧЕНИН

ТРАНСФОРМАТОРЫ  
ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ  
СВАРКИ



Ленинград  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
Ленинградское отделение  
1988

ББК 31.26  
320  
УДК 621.791.75:621.314.21

Рецензент П. А. Кошелев

Закс М. И. и др.

320 Трансформаторы для электродуговой сварки / М. И. Закс, Б. А. Каганский, А. А. Печенин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 136 с.: ил. — (Электросварочное оборудование). ISBN 5-283-04406-8

Систематизированы сведения о современных источниках переменного тока (сварочных трансформаторах), предназначенных для различных видов дуговой сварки. На основе анализа свойств сварочной дуги сформулированы требования к источникам. Рассмотрены принципы действия трансформаторов с механическим и электрическим (тиристорным) регулированием и узлов специализированных установок на их основе. Приведены сведения о схемах, конструкциях и технических характеристиках источников, выпускаемых промышленностью, освещены вопросы эксплуатации и техники безопасности.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области электродуговой сварки.

З 2302050000-115 186-88  
051(01)-88

ББК 31.26

ISBN 5-283-04406-8

© Энергоатомиздат, 1988

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время основной объем работ при дуговой сварке выполняется на переменном сварочном токе. Переменный ток используется при ручной сварке штучными электродами, при автоматической сварке под флюсом и при аргонодуговой сварке легких сплавов.

Источники переменного сварочного тока — самые массовые источники питания дуговой сварки. Основным узлом источников переменного тока является специальный, как правило, однофазный сварочный трансформатор. По этому основному узлу источники переменного тока часто называют просто сварочными трансформаторами.

Имеющиеся в литературе сведения о современных источниках переменного сварочного тока явно недостаточны для их изучения, проектирования и эксплуатации. Так, рассмотренные в монографии И. Я. Рабиновича [27] устройства уже устарели. В книге Б. Е. Патона и В. К. Лебедева [22] изложены только отдельные вопросы теории и расчетов трансформаторов с механическим регулированием. В работе О. Н. Братковой [9] источникам переменного тока уделено незначительное внимание.

Авторы настоящей брошюры ставили целью на основе обобщения опубликованных материалов и результатов исследований, проведенных авторами во Всесоюзном научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте электросварочного оборудования (ВНИИЭСО), систематизировать сведения о трансформаторах и специализированных установках переменного тока для различных способов дуговой сварки.

Книга знакомит читателя с особенностями горения дуги переменного тока и с требованиями к источникам сварочного тока. Описан принцип действия, рассмотрены электрические схемы и элементы расчета трансформаторов с механическим и электрическим регулированием.

Показана идентичность принципов тиристорного и магнитного фазового регулирования, приведены сведения о разработанных системах управления тиристорных трансформаторов, тепловом расчете тиристоров при сварочных нагрузках.

Отдельные главы посвящены рассмотрению вспомогательных устройств (возбудители и стабилизаторы горения дуги, устройства ограничения напряжения холостого хода и др.), описанию конструкций и технических характеристик источников, выпускаемых промышленностью, краткому освещению вопросов эксплуатации и техники безопасности.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Авторы

## СВАРОЧНАЯ ДУГА И ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## 1.1. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Дуга переменного тока находит применение при трех способах дуговой сварки: ручной сварке штучными электродами, автоматической сварке под слоем флюса, ручной и автоматической сварке легких сплавов вольфрамовым электродом в среде инертных газов.

Несмотря на широкое развитие механизированных способов сварки, ручная сварка штучными электродами остается наиболее распространенным видом дуговой сварки в промышленности, строительстве и на монтаже. К преимуществам ее следует отнести большую технологическую гибкость, возможность сварки в труднодоступных местах и в различных пространственных положениях, простоту, дешевизну и надежность оборудования. К недостаткам – сравнительно низкую производительность и значительные потери на угар и разбрызгивание. Борьба с этими недостатками ведется путем совершенствования свойств электродов и улучшения сварочных показателей источников тока.

Основной объем работ выполняется электродами диаметром 2–6 мм на токах до 400 А. Сварка ведется практически во всепогодных условиях.

Автоматическая сварка под слоем флюса нашла самое широкое применение при изготовлении различного рода резервуаров, труб большого диаметра, изделий из листовой и профильной стали. Флюс способствует получению чистого и плотного металла шва, без пор и включений, с ровной внешней поверхностью, с плавным переходом к основному металлу и высокими механическими свойствами сварного соединения; потери на угар и разбрызгивание при сварке практически отсутствуют. Для процесса характерны высокие коэффициенты наплавки (в 2–3 раза выше, чем при ручной сварке) и большие сварочные токи.

Наряду с однодуговым процессом широкое распространение получили двух- и трехдуговые процессы, когда сварочные дуги расположены с некоторым сдвигом вдоль линии шва и плавление электродных проволок производится в одну общую сварочную ванну. Скорость сварки при однодуговом процессе достигает 60 м/ч, при двух- и трехдуговом – соответственно 140 и 200 м/ч.

Для однодуговой сварки применяются сварочные автоматы тракторного типа и подвесные сварочные головки. Автомат для многоэлектродной сварки содержит обычно две или три одноэлектродные сва-

рочные головки. Почти все универсальные и специализированные сварочные автоматы выполняются с постоянной, независимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки.

Сварка вольфрамовым электродом в защитной среде инертного газа является основным способом соединения алюминия и его сплавов. В большинстве случаев газовая защита осуществляется аргоном, поэтому сварку часто называют аргонодуговой сваркой. Реже используется смесь аргона с гелием, позволяющая повысить проплавляющую способность дуги и улучшить формирование шва при больших скоростях сварки. Применение переменного тока позволяет сочетать разрушение – катодное распыление – оксидной пленки алюминия в полупериоды обратной полярности дуги, когда вольфрам является анодом, с преимущественным разогревом и проплавлением сварного соединения в полупериод прямой полярности (изделие – анод).

Процесс аргонодуговой сварки протекает без брызг и обеспечивает гладкие ровные швы с хорошим проплавлением кромок. Легкость и мобильность горелок позволяют выполнять сварку в труднодоступных местах и в любых пространственных положениях в ручном и автоматическом режимах.

Сварка может выполняться в режиме непрерывных и пульсирующих токов (импульсные режимы). При сварке пульсирующим током металл плавится во время импульса и кристаллизуется в течение паузы. В результате шов представляет собой серию частично перекрываемых точек. Сварка пульсирующим током обеспечивает лучшую стабильность проплавления в различных пространственных положениях. Снижение теплового потока в моменты пауз позволяет уменьшить перегрев и деформацию сварного соединения.

При питании сварочной дуги переменным током полярность электродов и условия существования дугового разряда периодически изменяются. В конце каждого полупериода сварочного тока дуга гаснет, температура и электропроводимость дугового промежутка снижаются. Повторное зажигание дуги в новом полупериоде возможно только при повышенном относительно напряжения горения дуги напряжении, называемом напряжением повторного зажигания  $U_3$ . Напряжение зажигания зависит от множества факторов, и в частности от теплофизических свойств материала и геометрии электродов, от наличия в дуговом промежутке паров легкоионизируемых элементов, от длины дуги и значения сварочного тока.

В полупериоды прямой полярности дуги, когда катодом является электрод (плюс на изделии), пики напряжения повторного зажигания обычно невелики. В полупериоды обратной полярности пики напряжения повторного зажигания могут превосходить нормальное напряжение горения дуги в несколько раз. Особенно большие пики напряжения зажигания имеют место при аргонодуговой сварке легких сплавов при формировании катода на изделии.

На устойчивость и скорость повторного зажигания дуги существенное влияние оказывают параметры источников питания. К ним прежде

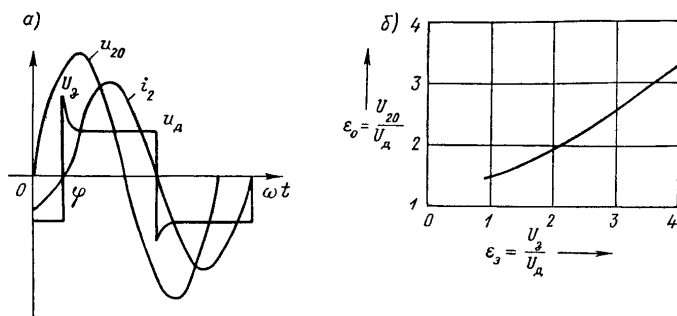


Рис. 1.1. Кривые сварочного тока, напряжения дуги и зависимость  $\epsilon_0 = f(\epsilon_3)$

всего относятся напряжение холостого хода, скорость его восстановления после обрыва тока дуги, форма кривой сварочного тока, фазовый сдвиг между напряжением холостого хода источника и током дуги.

На рис. 1.1, а представлены типичные кривые тока и напряжения дуги при питании от стандартного сварочного трансформатора. Кривая  $u_{20} = \sqrt{2} U_{20} \sin \omega t$  характеризует напряжение трансформатора при холостом ходе. При нагрузке в связи с наличием в сварочной цепи реактивного сопротивления сварочный ток  $i_2$  отстает от напряжения  $u_{20}$  на угол  $\varphi$ . Если формирование разряда при повторном возбуждении дуги задержалось, т. е. электрическая цепь разорвалась, напряжение на дуговом промежутке  $u_d$  стремится повыситься до значения, соответствующего текущему значению напряжения холостого хода  $u_{20}$ . Благодаря сдвигу фаз это напряжение в момент обрыва дуги близко к своему амплитудному значению, что благоприятно сказывается на повторном зажигании дуги.

Очевидно, что повышение напряжения на дуговом промежутке во время повторного зажигания дуги способствует повышению устойчивости ее горения.

Обеспечить повышение напряжения на дуговом промежутке проще всего, увеличивая напряжение холостого хода трансформатора. Однако такой путь невыгоден, так как приводит к увеличению массы и габаритов источника, снижению его КПД и коэффициента мощности. Возрастает опасность поражения персонала электрическим током. Поэтому при проектировании источников необходимо выбирать минимальное соотношение между напряжением холостого хода и напряжением дуги  $\epsilon_0 = U_{20}/U_d$ , обеспечивающее стабильное горение дуги переменного тока. Очевидно, что это соотношение в первую очередь зависит от кратности пика напряжения повторного зажигания  $\epsilon_3 = U_2/U_d$ .

Зависимость  $\epsilon_0$  от  $\epsilon_3$  представлена на рис. 1.1, б. Как следует из приведенной зависимости [22], для значений  $\epsilon_3 = 1,5 \dots 3,0$ , что имеет место при обычных условиях сварки сталей, значение  $\epsilon_0$  должно быть

принято  $\epsilon_0 \geq 1,8 \dots 2,5$ . Представленная зависимость получена в предположении чисто индуктивного характера сварочной цепи:  $x_{св}/R_{св} \rightarrow \infty$ , однако она вполне правомочна и для реальных сварочных цепей, где  $x_{св}/R_{св} \geq 5,0$ .

Отметим, что даже при отсутствии пиков повторного зажигания ( $\epsilon_3 = 1$ ) отношение напряжения холостого хода к напряжению дуги для обеспечения устойчивого горения дуги и возможности ее некоторого удлинения при сварке должно быть не ниже 1,57 ( $\epsilon_0 \geq 1,57$ ).

Экономичным и эффективным путем повышения устойчивости горения дуги является кратковременное увеличение напряжения на дуговом промежутке — только на время повторного возбуждения дуги с помощью специальных устройств — импульсных стабилизаторов горения дуги. Энергия импульса в стабилизаторах напряжения накапливается в емкостном накопителе и инжектируется в цепь дуги через тиристорное разрядно-синхронизирующее устройство.

Импульсные стабилизаторы уже многие годы находят применение при аргодуговой сварке легких сплавов и являются неотъемлемой частью оборудования для этого процесса сварки. При этом процессе сварки без стабилизаторов пики напряжения повторного зажигания достигают 200–250 В. Повышение напряжения холостого хода источников до таких значений неприемлемо по экономическим соображениям и недопустимо по условиям безопасности.

При других процессах сварки стабилизаторы горения дуги широкого распространения не получили. Однако установлено, что при сварке штучными электродами применение стабилизаторов позволяет несколько снизить напряжение холостого хода источников питания, применять при сварке на переменном токе качественные электроды, предназначенные для сварки на постоянном токе.

В последние годы импульсная стабилизация начала применяться в источниках с тиристорным прерывистым регулированием, где роль синхронизирующего и разрядного устройства выполняют тиристоры силовой схемы.

Известно, что скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке при обрыве сварочного тока в предыдущем полупериоде определяется его проводимостью. При этом происходит своеобразное саморегулирование процесса повторного зажигания: чем быстрее уменьшается проводимость, тем больше скорость нарастания напряжения.

При полном разрыве сварочной цепи напряжение на электродах должно мгновенно увеличиться до текущего значения напряжения холостого хода трансформатора:  $U_m \sin \varphi = \sqrt{2} U_{20} \sin \varphi$ .

Однако в реальных сварочных трансформаторах вследствие демпфирующего действия вихревых токов, возникающих в магнитопроводе и конструктивных элементах трансформатора, процесс нарастания напряжения происходит в два этапа: сначала мгновенно до значения  $U_m \sin \varphi - \Delta U$  и далее по экспоненте (рис. 1.2, а). Величина  $\Delta U$  и время затухания  $t_3$  определяются параметрами контуров вихревых токов.

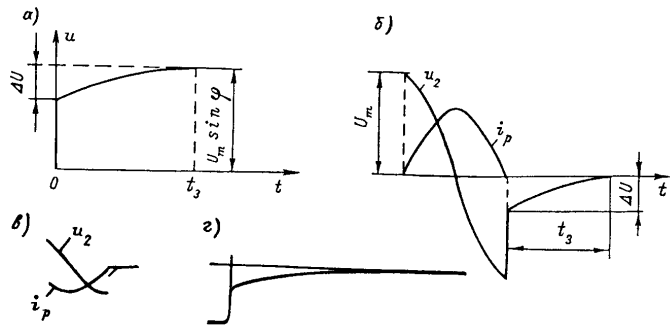


Рис. 1.2. Кривые напряжений на вторичной обмотке трансформатора и разрядного тока

Скорость нарастания напряжения, измеренная непосредственно на дуговом промежутке во время сварки, не может характеризовать динамические свойства сварочных трансформаторов, так как на нее существенно влияет остаточная проводимость дугового промежутка. Поэтому сравнение динамических свойств предложено [19] проводить на физической модели. Первичная обмотка исследуемого сварочного трансформатора замыкается накоротко, а вторичная обмотка через переключатель полярности и тиристор подключается к предварительно заряженному конденсатору. Кривая разрядного тока  $i_p$  представляет собой полуволну синусоиды (рис. 1.2, б). Под действием разрядного тока создается поле рассеяния, которое наводит вихревые токи в элементах конструкции трансформатора. В конце полупериода разряда вследствие односторонней проводимости тиристора происходит обрыв тока и создаются условия, свойственные сварочной цепи в начале каждого полупериода сварки. Спад напряжения  $u_2$  на вторичной обмотке происходит сначала скачком, а потом по закону экспоненты.

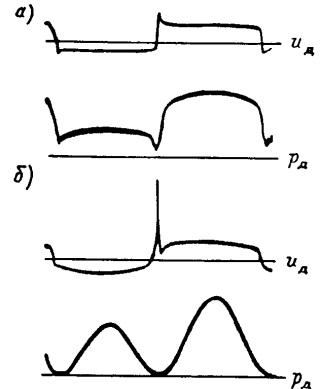
Соотношение  $\Delta U$  и время  $t_3$  характеризуют динамические свойства сварочных трансформаторов; очевидно, чем больше эти величины, тем хуже динамические свойства.

На рис. 1.2, в, г приведены типичные осциллограммы рассматриваемого процесса, снятые на двухлучевом импульсном осциллографе с калиброванной длительностью развертки. Ввиду того что для оценки динамических свойств источников необходим только конечный участок кривой  $u_2$  с момента обрыва разрядного тока, этот участок осциллографировался при больших скоростях развертки (рис. 1.2, г).

Средние показатели динамических свойств для современных сварочных источников:  $\Delta U/U_m = 0,2 \dots 0,3$ ;  $t_3 = 100 \dots 140$  мкс.

Устойчивость процесса сварки на переменном токе существенно зависит от формы кривой сварочного тока. При искажении формы

Рис. 1.3. Осциллограммы мощности и напряжения дуги. Режим сварки 180 А, 16 В



кривой тока относительно синусоидальной, с замедлением его прохождения через нулевые значения, наблюдается снижение стабильности горения дуги. При улучшении формы тока до синусоидальной и далее до трапециoidalной и прямоугольной устойчивость горения дуги возрастает.

Это явление полностью согласуется с современными представлениями о физических процессах, происходящих при повторном возбуждении открытых дуг переменного тока. Как известно, основным механизмом развития открытой дуги в начале каждого полупериода переменного тока является разогрев дугового газа после некоторого его охлаждения при смене полярности. Все меры, способствующие ускорению нагрева газа после перехода тока через нуль, направлены на повышение стабильности дуг.

На рис. 1.3 представлены осциллограммы мощности  $p_d$  и напряжения дуги  $u_d$  при аргодуговой сварке от источника с прямоугольной (а) и синусоидальной (б) формой тока. Более равномерное распределение мощности дуги в источнике с прямоугольной формой тока сопровождается снижением пика напряжения повторного зажигания. Надежное повторное зажигание дуги в источниках с прерывистым тиристорным регулированием практически невозможно без использования импульсных стабилизаторов горения дуги.

## 1.2. ПОСТОЯННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СВАРОЧНОГО ТОКА ПРИ АРГОДУГОВОЙ СВАРКЕ

Различие теплофизических свойств и условий охлаждения электрода и изделия, особенно сильное при сварке вольфрамовым электродом алюминиевых сплавов, приводит к тому, что напряжение на дуге в одном полупериоде резко отличается от напряжения в другом полупериоде. Имеет место так называемое выпрямляющее действие дуги. Если не принять специальных ограничительных мер, в сварочной цепи возникает большая по значению постоянная составляющая тока — до 70–80% от действующего значения рабочего сварочного тока.

Известно [22], что значение постоянной составляющей главным образом зависит от соотношения напряжений дуги обратной и прямой полярности  $\epsilon_{1,2} = U_{d1}/U_{d2}$  и растет с увеличением этого соотношения.

Напряжение холостого хода источника  $U_{20}$  оказывает незначительное влияние на значение постоянной составляющей тока, причем увеличение соотношения  $U_{д1}/U_{20}$  сопровождается снижением постоянной составляющей.

Постоянная составляющая сварочного тока создает в трансформаторе постоянную составляющую магнитного поля, вызывающую рост намагничивающего тока, снижение отдаваемой трансформатором мощности и коэффициента мощности. Значительная постоянная составляющая тока отрицательно сказывается на технологии сварки. Поэтому в источниках питания аргодуговой сварки принимаются меры по устранению постоянной составляющей тока или ее ограничению до требуемого по технологическим соображениям значения.

До недавнего времени среди многих известных способов устранения или ограничения постоянной составляющей тока практическое применение имел только один – включение в сварочную цепь громоздкой и дорогостоящей конденсаторной батареи, препятствующей протеканию в цепи постоянного тока.

В последние годы во ВНИИЭСО разработано новое, компактное и экономичное диодно-тиристорное устройство ограничения постоянной составляющей тока [5], которое будет рассмотрено в четвертой главе.

Для пояснения сущности и принципа работы устройства в традиционных источниках с амплитудным регулированием тока рассмотрим динамику роста постоянной составляющей тока при симметричном фазовом регулировании тока.

Упрощенная схема замещения источника тока с фазорегулятором в сварочной цепи представлена на рис. 1.4, а, где  $U_m \sin(\omega t + \varphi)$  – мгновенное значение вторичного напряжения холостого хода идеального сварочного трансформатора;  $\varphi$  – угол включения тиристоров;  $L$  – эквивалентная индуктивность сварочного контура.

Анализ схемы проведен в предположении отсутствия активного сопротивления; напряжение на дуге принято не зависящим от тока:

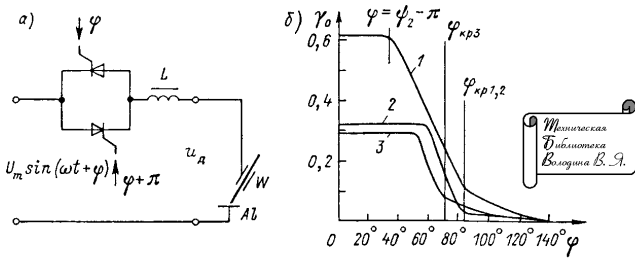


Рис. 1.4. Упрощенная схема замещения источника тока с фазорегулятором в сварочной цепи (а) и зависимости  $\gamma_0 = f(\varphi)$  (б)  
1 – при  $\epsilon_1 = 0,25$ ;  $\epsilon_2 = -0,1$ ; 2 – при  $\epsilon_1 = 0,15$ ;  $\epsilon_2 = -0,1$ ; 3 – при  $\epsilon_1 = 0,3$ ;  $\epsilon_2 = -0,2$

$$u_{д1} = U_{д1} > 0; u_{д2} = U_{д2} < 0; |U_{д1}| > |U_{д2}|,$$

где  $u_{д1}$ ,  $U_{д1}$  – мгновенное и среднее (в зоне существования тока) значения напряжения обратной полярности (“плюс” на электроде);  $u_{д2}$ ,  $U_{д2}$  – мгновенное и среднее значения напряжения прямой полярности. Основное уравнение цепи

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) - L \frac{di_2}{dt} - U_{д1} = 0,$$

где  $i_2$  – ток дуги.

Найдем в общем виде решение этого уравнения для тока дуги в относительных единицах.

За базовые величины примем напряжение  $U_m$  и амплитуду тока короткого замыкания цепи  $I_m = \sqrt{2} I_{2к.з} = U_m/\omega L$ .

Уравнение тока дуги в относительных единицах

$$\gamma = -\cos(\theta + \varphi) - \epsilon_d \theta + C, \quad (1.1)$$

где  $\gamma = i_2/I_m$ ;  $\epsilon_d = U_{д1}/U_m$ ;  $\theta = \omega t$ ;  $C$  – постоянная интегрирования.

Анализ уравнения (1.1) при несимметричной нагрузке [16] ( $|U_{д1}| > |U_{д2}|$ ) показал наличие трех режимов работы схемы: полностью управляемого режима (режима прерывистых токов), полуправляемого режима, неуправляемого (полнофазного) режима.

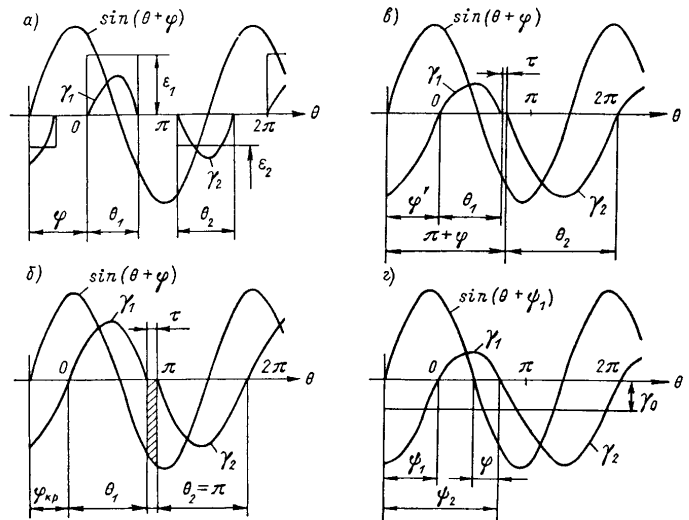


Рис. 1.5. Диаграммы напряжения и тока при несимметричной нагрузке

Временные диаграммы напряжения и тока для режима прерывистых токов представлены на рис. 1.5, а.

Постоянную интегрирования для полупериодов прямой и обратной полярности найдем из условия  $\gamma = 0$  при  $\theta = 0$  и  $\theta = \pi$ .

Уравнения тока полупериодов обратной  $\gamma_1$  и прямой  $\gamma_2$  полярности (в зоне существования токов от 0 до  $\theta_1$  и от  $\pi$  до  $\theta_2$ ):

$$\gamma_1 = -\cos(\theta + \varphi) + \cos \varphi - \epsilon_1 \theta; \quad (1.2)$$

$$\gamma_2 = -\cos(\theta + \varphi) - \cos \varphi - \epsilon_2 (\theta - \pi). \quad (1.3)$$

Среднее значение токов полупериодов и значение постоянной составляющей ( $\gamma_0$ ):

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{1cp} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_1} \gamma_1 d\theta = \frac{1}{2\pi} \left[ \sin \varphi - \sin(\theta_1 + \varphi) + \theta_1 \cos \varphi - \right. \\ &\left. - \epsilon_1 \frac{\theta_1^2}{2} \right]; \\ \gamma_{2cp} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\pi + \theta_2} \gamma_2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \left[ -\sin \varphi + \sin(\theta_2 + \varphi) - \right. \\ &\left. - \theta_2 \cos \varphi - \epsilon_2 \frac{\theta_2^2}{2} \right]; \\ \gamma_0 &= \gamma_{1cp} + \gamma_{2cp} = \frac{1}{2\pi} \left[ -\sin(\theta_1 + \varphi) + \sin(\theta_2 + \varphi) + \right. \\ &\left. + (\theta_1 - \theta_2) \cos \varphi - \frac{1}{2} (\epsilon_1 \theta_1^2 + \epsilon_2 \theta_2^2) \right]. \end{aligned} \right\} (1.4)$$

Решение уравнений (1.2)–(1.4) на ЭВМ позволяет проследить динамику роста постоянной составляющей тока для режима прерывистых токов в зависимости от угла включения тиристоров  $\varphi$  при различных значениях и соотношениях  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  (рис. 1.4, б).

В первом режиме работы схемы по мере уменьшения угла включения  $\varphi$  увеличивается как амплитуда, так и длительность полувольты тока прямой и обратной полярности, причем  $\theta_1 < \theta_2$ .

При некотором критическом угле включения  $\varphi_{кр}$  длительность полувольты тока прямой полярности становится равной полупериоду  $\theta_2 = \pi$ . При этом момент окончания тока прямой полярности совпадает с моментом включения тиристора обратной полувольты тока, режим прерывистых токов заканчивается (рис. 1.5, б).

Из уравнения (1.3), положив  $\gamma = 0$  при  $\theta = 2\pi$ , найдем значение критического угла включения:

$$\cos \varphi_{кр} = -\frac{\pi}{2} \epsilon_2, \quad (1.5)$$

из чего следует, что  $\varphi_{кр}$  зависит от соотношения напряжения дуги прямой полярности и напряжения холостого хода.

Определим среднее значение напряжения дуги при критическом угле включения.

Положив в уравнении (1.2)  $\gamma = 0$  при  $\theta = \theta_1$ , с учетом уравнения (1.5) и того, что в этом режиме  $\theta_2 = \pi$ , получим

$$\epsilon_1 \theta_1 + \epsilon_2 \theta_2 = -\cos(\theta_1 + \varphi_{кр}) - \cos \varphi_{кр} = -\int_{\pi - \tau}^{\pi} \sin(\theta + \varphi_{кр}) d\theta \quad (1.6)$$

или

$$\frac{1}{2\pi} (U_{д1} \theta_1 + U_{д2} \theta_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi - \tau}^{\pi} U_m \sin(\theta + \varphi_{кр}) d\theta.$$

Таким образом, среднее значение напряжения дуги равно среднему за период напряжению на тиристорах (без учета падений напряжений на открытых тиристорах):  $U_{д.ср} = U_{VS.ср}$ .

Вольт-секундная площадь, соответствующая  $U_{VS.ср}$ , на рис. 1.5, б заштрихована.

Значение паузы  $\tau$  может быть приближенно вычислено из уравнения (1.6), если учесть, что  $\theta_1 \approx \pi$ , а значение  $\sin(\theta + \varphi_{кр})$  при  $\pi - \tau < \theta < \pi$  принять постоянным и равным  $-1$ . Тогда

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 \theta_1 + \epsilon_2 \theta_2 &\approx -\sin(\pi + \varphi_{кр}) \int_{\pi - \tau}^{\pi} d\theta = \tau; \\ \tau &= \pi(\epsilon_1 + \epsilon_2). \end{aligned} \right\} (1.7)$$

При дальнейшем уменьшении угла включения (рис. 1.5, в) тиристор обратной полувольты тока теряет управление, так как он может проводить ток только после закрытия тиристора прямой полувольты (полууправляемый режим).

Фаза включения полувольты прямой полярности уменьшается, длительность ее растет; фаза включения полувольты обратной полярности возрастает, длительность ее сокращается, увеличивается значение постоянной составляющей сварочного тока (см. рис. 1.4, в).

Уравнение тока полупериода прямой полярности (1.3) остается без изменений. Ток обратной полярности найдем из уравнения (1.1). Поскольку в полууправляемом режиме в качестве угла включения тиристора обратной полярности выступает момент окончания тока прямой полярности, в уравнение (1.2) вместо  $\varphi$  подставим  $\varphi' = \varphi + \theta_2 - \pi$ :

$$\gamma_1 = \cos(\theta + \varphi + \theta_2) - \cos(\varphi + \theta_2) - \epsilon_1 \theta_1. \quad (1.8)$$

Резкое нарастание постоянной составляющей тока (см. рис. 1.4, б) продолжается до тех пор, пока не исчезнет бестоковая пауза  $\tau$  и не установится неуправляемый (полнофазный) режим (рис. 1.5, г).

Фазовые сдвиги токов прямой и обратной полярности  $\psi_1 = \varphi'$  и  $\psi_2 = \varphi + \pi$  в полнофазном режиме определим из уравнения (1.8), считая  $\gamma = 0$  при  $\theta = \theta_1 = 2\pi - \theta_2$ :

$$\cos \varphi - \cos(\varphi - \theta_1) = \epsilon_1 \theta_1;$$



$$\psi_1 = -\arcsin \frac{\epsilon_1 \theta_1}{2 \sin \frac{\theta_1}{2}} - \frac{\theta_1}{2} + \pi; \quad (1.9)$$

$$\psi_2 = -\arcsin \frac{\epsilon_1 \theta_1}{2 \sin \frac{\theta_1}{2}} + \frac{\theta_1}{2} + \pi. \quad (1.10)$$

Поскольку в полнофазном режиме тиристоры полностью открыты ( $U_{VS_{cp}} = 0$ ), то из соотношения (1.6) имеем  $\epsilon_1 \theta_1 + \epsilon_2 \theta_2 = 0$ , а так как  $\theta_1 + \theta_2 = 2\pi$ , то

$$\theta_1 = -2\pi \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2}. \quad (1.11)$$

Определив углы фазового сдвига  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , перепишем уравнения тока в полнофазном режиме в виде

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= -\cos(\theta + \psi_1) + \cos \psi_1 - \epsilon_1 \theta; \\ \gamma_2 &= -\cos(\theta + \psi_1) + \cos \psi_1 + \epsilon_2 (2\pi - \theta). \end{aligned}$$

Постоянная составляющая тока

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_1} \gamma_1 d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{2\pi} \gamma_2 d\theta; \\ \gamma_0 &= \cos \psi_1 - \epsilon_1 \frac{\theta_1}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Приведенный анализ и численные расчеты показывают, что доля постоянной составляющей в действующем значении тока дуги резко возрастает при изменении угла включения от критического до полнофазного значения; значения критического угла включения и бестоковой паузы  $\tau$  не зависят от индуктивного сопротивления цепи (уставки сварочного тока) и незначительно изменяются при изменении напряжения дуги в рабочих пределах (см. рис. 1.4, б). Таким образом, включив в сварочную цепь встречно-параллельно соединенные тиристоры и зафиксировав угол их включения равным  $\varphi = \varphi_{кр}$ , можно добиться эффективного ограничения постоянной составляющей тока с минимальной длительностью бестоковых пауз при переходе от обратной полярности к прямой. Поскольку тиристор полуволны обратной полярности при критическом угле включения теряет управление, его можно заменить неуправляемым диодом.

**Пример.** Рассчитаем критический и полнофазный режимы сварочной цепи с тиристорным фазорегулятором при напряжении холостого хода трансформатора  $U_{20} = 70$  В и токе короткого замыкания цепи  $I_{2к.з} = 500$  А.

Напряжение дуги обратной полярности  $U_{д1} = 20$  В, прямой полярности  $U_{д2} = -10$  В ( $\epsilon_1 = 0,2$ ;  $\epsilon_2 = -0,1$ ).

*Критический режим:*

$$\cos \varphi_{кр} = -\frac{\pi}{2} \cdot 0,1; \quad \varphi_{кр} = 81^\circ \text{ эл.};$$

$$\theta_2 = \pi; \quad \tau = 0,1\pi (18^\circ); \quad \theta_1 = \pi - \tau (162^\circ);$$

$$\gamma_{1cp} = 0,242; \quad \gamma_{2cp} = -0,314; \quad \gamma_0 = -0,072;$$

$$I_{1cp} = \gamma_{1cp} I_m = 171 \text{ А}; \quad I_{2cp} = -222 \text{ А}; \quad I_0 = -51 \text{ А}.$$

Использованы уравнения (1.4), (1.5), (1.7).

*Полнофазный режим:*

$$\theta_1 = -2\pi \frac{-0,1}{0,2 + 0,1} = \frac{2}{3}\pi (120^\circ);$$

$$\psi_2 = \arcsin \frac{0,1 \cdot \frac{2}{3}\pi}{2 \sin \frac{2\pi}{3 \cdot 2}} + \frac{2\pi}{3 \cdot 2} + \pi (46^\circ + 180^\circ);$$

$$\psi_1 = \psi_2 - \theta_1 = 106^\circ;$$

$$\varphi = 46^\circ; \quad \gamma_0 = \cos \psi_1 - \frac{\theta_1}{2} \epsilon_1 = -0,485; \quad I_0 = -343 \text{ А}.$$

Использованы уравнения (1.9)–(1.12).

### 1.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОЧНИКАХ ТОКА

Основным узлом современных источников переменного сварочного тока является специальный, как правило, однофазный сварочный трансформатор той или иной конструкции. Трансформатор разделяет сварочную цепь и силовую сеть, понижает напряжение сети до необходимого для сварки значения, самостоятельно или в комплекте с дополнительными устройствами обеспечивает формирование требуемых статических внешних характеристик и регулирование сварочного тока.

Конструкции сварочных трансформаторов весьма разнообразны. В зависимости от способа регулирования тока их можно подразделить на две группы устройств – с механическим и электрическим регулированием. В первую группу входят устройства, связанные с применением подвижных обмоток и секций магнитопроводов, во вторую – устройства, связанные с подмагничиванием магнитопроводов постоянным током и тиристорным регулированием.

При ручной дуговой сварке используются в основном трансформаторы с механическим регулированием. В комплекте с защитным щитком или маской и простейшим инструментом сварщика (электрододержатель, струбцина для заземления, щетка, молоток и др.) они составляют основное оборудование поста для ручной сварки. Диапазон номинальных

токов трансформаторов для ручной дуговой сварки 125–500 А. Трансформаторы выпускаются по ГОСТ 95–77.

Для сварки под слоем флюса используются только трансформаторы с электрическим регулированием, позволяющим обеспечить стабилизацию режима при колебаниях напряжения сети и простое дистанционное регулирование.

При многодуговой сварке питание каждой сварочной дуги осуществляется от самостоятельного однофазного источника, что позволяет производить независимое регулирование режима каждой дуги. Для равномерной загрузки сети при трехдуговой сварке источники включают в разные фазы, а при двухдуговой — по двухфазной симметричной схеме.

Диапазон номинальных токов трансформаторов для сварки под флюсом 1000–2000 А. Трансформаторы выпускаются по ГОСТ 7012–77.

В состав оборудования для аргонодуговой сварки, помимо источника питания с электрическим регулированием, входят устройство для первоначального возбуждения дуги и стабилизации ее горения в процессе сварки, устройство для ограничения или регулирования постоянной составляющей сварочного тока, аппаратура управления циклом сварки, программатор импульсных режимов.

Такие комплексные устройства, сконструированные в общем корпусе, получили название установок для аргонодуговой сварки. В состав установок для ручной сварки входит комплект сварочных горелок.

Установки для аргонодуговой сварки выпускаются по отраслевым техническим условиям на номинальные токи 315 и 500 А.

По виду статических внешних характеристик источника тока можно подразделить на источники с крутопадающими (ПВХ) и пологопадающими, или "жесткими" (ЖВХ), внешними характеристиками. Источники, имеющие одновременно оба вида внешних характеристик, получили название универсальных.

Статической внешней характеристикой источника называют зависимость напряжения вторичной цепи от тока  $U_2 = f(I_2)$ . Ток вторичной цепи является сварочным током. Вторичное напряжение при разомкнутой сварочной цепи называется напряжением холостого хода  $U_{20}$ , а при некотором значении сварочного тока — рабочим напряжением на зажимах источника. Вид внешних характеристик источника обычно связан с особенностями сварочного процесса, для которого предназначен источник.

Требования к виду внешних характеристик определяют такие показатели сварочного процесса, как тип электрода (плавящийся, неплавящийся), характер среды, в которой происходит сварка (открытая дуга, дуга под флюсом, в защитных газах), степень механизации процесса (ручная, полуавтоматическая, автоматическая сварка), способ регулирования режима горения дуги (саморегулирование, автоматическое регулирование напряжения дуги).

Так, для ручной дуговой сварки покрытыми штучными электродами, аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом, механизиро-

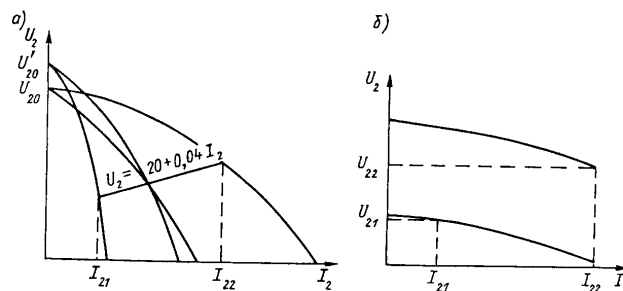


Рис. 1.6. Внешние характеристики

ванной сварки под флюсом на автоматах с регулированием скорости подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения дуги используются ПВХ (рис. 1.6, а).

При ПВХ источник работает в режиме регулятора сварочного тока. При этом сварочный ток может регулироваться в заданном диапазоне от минимального  $I_{21}$  до максимального  $I_{22}$  значения плавно или ступенями. По технологическим (сварочным) и экономическим соображениям часто используют плавно-ступенчатое регулирование, когда две (или более) ступени регулирования сочетаются с плавным регулированием внутри каждой ступени.

Регулирование сварочного тока при ПВХ производится при приблизительно постоянстве напряжения холостого хода  $U_{20}$ . Часто при плавно-ступенчатом регулировании переход на ступень малых токов сопровождается повышением напряжения холостого хода  $U'_{20}$ .

Каждому значению сварочного тока соответствует определенное условное значение рабочего напряжения. Так, при ручной дуговой сварке штучными электродами согласно требованию ГОСТ 95–77 рабочее напряжение (в вольтах) и сварочный ток связаны соотношением

$$U_2 = 20 + 0,04 I_2.$$

Каждому виду сварки соответствует определенная крутизна наклона ПВХ. Так, например, наиболее крутые характеристики используются для аргонодуговой сварки, более пологие — для ручной сварки штучными электродами, еще более пологие — для сварки под флюсом.

Регулирование длины дуги в процессе сварки при ПВХ осуществляется рукой сварщика или системой регулирования длины дуги сварочного автомата.

При автоматической сварке под флюсом при постоянной, не зависящей от напряжения дуги скорости подачи электродной проволоки используются ЖВХ (рис. 1.6, б).

Источник питания при ЖВХ работает как регулятор напряжения. Рабочее напряжение регулируется в заданных пределах от минимального

$U_{21}$  до максимального  $U_{22}$  значения, причем диапазон регулирования рабочего напряжения выбирается в строгом соответствии с заданным диапазоном сварочного тока от  $I_{21}$  до  $I_{22}$ .

Регулирование напряжения при ЖВХ также может быть плавным, ступенчатым и смешанным. Значение сварочного тока определяется скоростью подачи электродной проволоки, а источник питания задает напряжение дуги и обеспечивает саморегулирование длины дуги.

В трансформаторах для сварки под флюсом согласно ГОСТ 7012–77 рабочее напряжение (в вольтах) и сварочный ток связаны соотношением:

$$U_2 = 19 + 0,037 I_2$$

– для трансформаторов на номинальный ток 1000 А и

$$U_2 = 13 + 0,0315 I_2$$

– для трансформаторов на номинальный ток 2000 А.

Нагрузка источника сварочного тока, как правило, является переменной. Весь процесс сварки обычно состоит из ряда повторяющихся циклов длительностью  $t_{ц}$ , в которых рабочий период  $t_p$  чередуется с паузой  $t_{п}$ , связанной со сменой электрода, подготовкой к наложению следующего шва и т. п.

Согласно стандартам на сварочные источники, различают три типовых режима работы:

1. Продолжительный – режим работы при неизменной нагрузке.
2. Переменный – режим, при котором кратковременные рабочие периоды чередуются с периодами работы источника на холостом ходу. Режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки

$$ПН = \frac{t_p}{t_{ц}} \quad \text{или в процентах} \quad ПН = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100.$$

3. Повторно-кратковременный режим, при котором кратковременные рабочие периоды чередуются с периодами отключения силовой цепи источника от сети. Режим характеризуется относительной продолжительностью включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{ц}} \quad \text{или в процентах} \quad ПВ = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100.$$

Длительность цикла работы при перемежающемся и повторно-кратковременном режимах 5 мин для источников ручной дуговой сварки и 10 мин для источников механизированной сварки.

Номинальный ток источника  $I_{2ном}$  всегда связан с режимом работы, на который рассчитан данный источник. Например,  $I_{2ном} = 315$  А,  $ПВ = 60\%$ .

Длительно допустимый по нагреву ток источника  $I_{2дл}$  связан с номинальным сварочным током и режимом работы следующим соотношением:

$$I_{2дл} = I_{2ном} \sqrt{ПН} \quad \text{или} \quad I_{2дл} = I_{2ном} \sqrt{ПВ}.$$

Источники сварочного тока согласно требованиям ГОСТ 15150–69 изготавливаются в климатических исполнениях У, УХЛ, Т, для категорий размещения 2, 3 и 4.

Все отечественные источники сварочного тока предназначены для работы в атмосфере (П), характерной для машиностроительных промышленных предприятий.

Источники исполнения У и УХЛ предназначены для работы в микроклиматических районах СССР с умеренным (У) и умеренным и холодным (УХЛ) климатом и для поставки на экспорт в соответствующие страны. Источники исполнения Т предназначены для поставки на экспорт в страны с тропическим климатом.

Источники категории размещения 2 предназначены для эксплуатации под навесом, в палатках, в закрытых кузовах и прицепах, в металлических помещениях без теплоизоляции; источники категории размещения 3 – для эксплуатации в неотопляемых или нерегулярно отапливаемых закрытых помещениях; источники категории размещения 4 – для эксплуатации в закрытых помещениях с искусственным регулированием температуры и влажности.

Для сварочного оборудования исполнений У2, У3, УХЛ2, УХЛ3 установлены предельные рабочие температуры от  $-40$  до  $+40$  °С, для исполнений У3.1, УХЛ3.1 – от  $-10$  до  $+40$  °С, для исполнения УХЛ4 – от  $+1$  до  $+35$  °С, для исполнений Т2, Т3 – от  $-10$  до  $+45$  °С, для исполнения Т4 – от  $+1$  до  $+45$  °С.

Температура транспортирования для всех исполнений от  $-50$  до  $+50$  °С.

Степень защиты оболочек по ГОСТ 14254–80 для трансформаторов ручной дуговой сварки принята IP22, для трансформаторов для автоматической сварки и установок аргонодуговой сварки – не ниже IP21.

Конструкции всех источников тока удовлетворяют требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0–75, ГОСТ 12.2.007.8–75 и ГОСТ 12.1.003–83.

Каждому источнику присваивается условное обозначение типа изделия, которое состоит из буквенной и цифровой части. Первая буква означает вид изделия (Т – трансформатор, У – установка), вторая – вид сварки (Д – дуговая), третья – способ сварки (Ф – под флюсом, Г – в защитных газах, отсутствие буквы означает ручную дуговую сварку); четвертая дает дальнейшее пояснение исполнения изделия (Ж или П – с жесткими или падающими внешними характеристиками, М или Э – с механическим или электрическим регулированием). Две или три цифры после черточки указывают значение номинального сварочного тока округленно в десятках ампер, последующая цифра – регистрационный номер изделия. Следующая цифра означает номер модификации (если таковая имеется), а последующие буква и цифра – климатическое исполнение и категорию размещения. Так, наименование изделия ТДМ-317-1У2 обозначает: трансформатор для ручной дуговой

сварки с механическим регулированием на ток 315 А, регистрационный номер 7, модификация 1 (с ограничителем напряжения холостого хода), исполнение У, категория размещения 2.

Пример записи обозначения изделия при его заказе:

Трансформатор сварочный ТДМ-317-1У2, 380 В, 50 Гц, ГОСТ 95–77.

ГЛАВА 2



## ТРАНСФОРМАТОРЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

### 2.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатор — это электрический аппарат, предназначенный для преобразования одного переменного напряжения в другое напряжение той же частоты.

Трансформатор содержит две (или более) электрически не связанные между собой обмотки, размещенные на замкнутом стальном магнитопроводе. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы изготавливаются из листовой электротехнической стали. В современных отечественных сварочных трансформаторах находят преимущественное применение холоднокатаная анизотропная рулонная сталь марок 3404, 3405 толщиной 0,35 мм и 3414 толщиной 0,35 и 0,5 мм с термостойким электроизоляционным покрытием, с содержанием кремния 2,8–3,8%, выпускающаяся по ГОСТ 21427.1–83.

По характеру устройства магнитной цепи различают трансформаторы броневого и стержневого типа, по характеру устройства обмоток — трансформаторы с цилиндрическими и дисковыми обмотками.

В источниках переменного сварочного тока преимущественное распространение получили трансформаторы со стержневыми магнитопроводами как с цилиндрическими, так и с дисковыми обмотками; трансформаторы работают с воздушным естественным или принудительным охлаждением.

Трансформаторы с цилиндрическими обмотками (рис. 2.1, а), в которых первичные 1 и вторичные 2 обмотки наматываются концентрически одна поверх другой, относятся к группе трансформаторов с минимальным, или нормальным, электромагнитным рассеянием и являются полными аналогами силовых воздушных трансформаторов идентичной мощности.

Трансформаторы с дисковыми обмотками (рис. 2.1, б), в которых первичные 1 и вторичные 2 обмотки обычно разнесены относительно друг друга, относятся к группе специальных сварочных трансформаторов с увеличенным, или развитым, электромагнитным рассеянием.

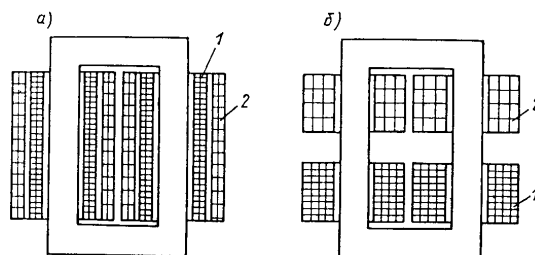


Рис. 2.1. Трансформаторы с цилиндрическими (а) и дисковыми (б) обмотками

Анализ работы трансформатора со стальным магнитопроводом, имеющим переменную магнитную проницаемость, принято проводить на основе картины магнитного поля, схематически показанной для различных режимов работы на рис. 2.2.

Если при холостом ходе (вторичная обмотка разомкнута) к первичной обмотке приложить переменное напряжение  $u_1$ , то она станет потреблять ток холостого хода  $i_{10}$ . Этот ток создаст переменный магнитный поток  $\Phi_1$ .

Магнитный поток целесообразно разделить на две части (рис. 2.2, а): главный поток  $\Phi_0$  и поток рассеяния  $\Phi_{1s}$ . Главный поток замыкается по магнитопроводу и совпадает по фазе с реактивной составляющей тока холостого хода  $i_{1p}$ , т. е. намагничивающим током. Связь между главным потоком и намагничивающим током определяется кривой намагничивания стального магнитопровода. Поток рассеяния  $\Phi_{1s}$  замыкается по параллельному пути через воздух, прямо пропорционален первичному току и совпадает с ним по фазе.

Коэффициент пропорциональности между потокоцеплением и током определяет индуктивность, и в данном случае индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора  $L_{1s} = w_1 \Phi_{1s} / i_1$ .

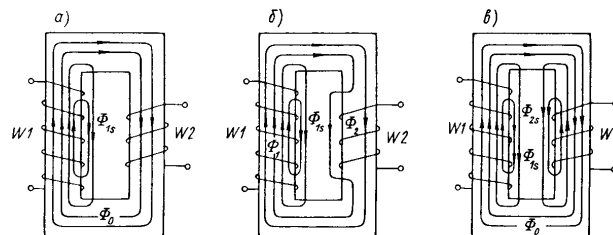


Рис. 2.2. Картина магнитного поля трансформатора при холостом ходе (а) и при нагрузке (б, в)

В передаче мощности от первичной обмотки ко вторичной участвует только главный поток.

ЭДС самоиндукции в первичной обмотке можно также разложить на две составляющие: ЭДС, индуцируемую главным потоком,  $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}$  и ЭДС, индуцируемую потоком рассеяния,  $e_{1s} = -L_{1s} \frac{di_1}{dt}$ .

Приложенное к обмотке напряжение  $u_1$  уравнивает падение напряжения на активном сопротивлении обмотки  $r_1$  и наводимые в ней ЭДС.

Заменяв кривую тока  $i_{10}$  эквивалентной синусоидой, пользуясь символическим методом и обозначив через  $U_E$  составляющую напряжения, уравнивающую ЭДС  $E_1$ , можно записать уравнение равновесия напряжений, построить схему замещения и векторную диаграмму трансформатора при холостом ходе (рис. 2.3, а).

Уравнение равновесия напряжений

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_{10} + j\omega L_{1s} \dot{I}_{10} + \dot{U}_E, \quad (2.1)$$

где  $\dot{U}_E = -\dot{E}_1$ .

Активная проводимость  $g_0$  (рис. 2.3, а), связанная с мощностью потерь в магнитопроводе  $P_c$  на гистерезис и вихревые токи, равна

$$g_0 = I_{1a} / U_E = P_c / U_E^2.$$

Реактивная проводимость обмотки  $b_0$  для намагничивающего тока

$$b_0 = I_{1p} / U_E \approx I_{10} / U_E,$$

так как обычно  $I_{1p} \gg I_{1a}$ .

Для удобства анализа работы трансформатора под нагрузкой принято приводить обмотки к одному числу витков. Операция приведения состоит в замене одной из обмоток эквивалентной обмоткой с числом витков, равным числу витков второй обмотки, причем такая замена не должна отразиться на режиме работы первой обмотки.

Из теории трансформаторов [23] известно, что при приведении вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки параметры эквивалентной обмотки, обозначенные индексом "штрих", связаны с параметрами основной обмотки следующими соотношениями:

$$e'_2 = ne_2; i'_2 = i_2/n; r'_2 = r_2/n^2; L'_{2s} = L_{2s}/n^2,$$

где  $n = w_1/w_2$  — коэффициент трансформации.

При приведении первичной обмотки ко вторичной

$$e'_1 = e_1/n; i'_1 = i_1/n; r'_1 = r_1/n^2; L'_{1s} = L_{1s}/n^2.$$

После приведения можно производить непосредственное сравнение ЭДС и токов в разных обмотках.

Заменяем дугое напряжение эквивалентной синусоидой и, учитывая, что оно совпадает по фазе со сварочным током, примем нагрузку сварочного трансформатора чисто активной. При нагрузке с ростом

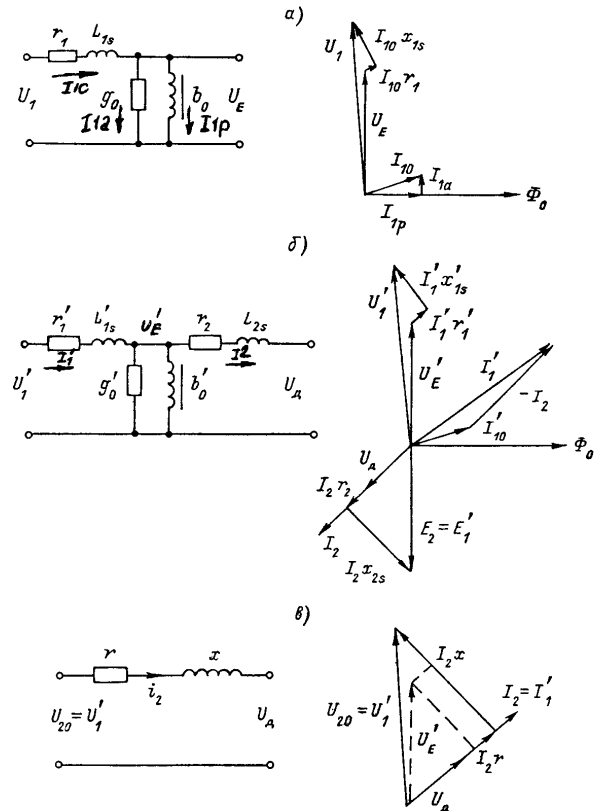


Рис. 2.3. Схемы замещения и векторные диаграммы трансформатора при холостом ходе (а) и при нагрузке (б, е)

тока  $i_2$  должен увеличиваться и ток  $i_1$ , при этом согласно выражению (2.1) должно снижаться напряжение  $U_E$ .

В трансформаторах с нормальным рассеянием, где падения напряжения на активном  $r_1$  и индуктивном  $x_{1s} = \omega L_{1s}$  сопротивлениях малы по сравнению с  $U_E$ , можно считать, что главный поток трансформатора при его нагрузке от холостого хода ( $I_2 = 0$ ) до номинального режима ( $I_{2ном}$ ) практически не меняется. Следовательно, для возбуждения основного потока при нагрузке необходим практически тот же

намагничивающий ток, что и при холостом ходе. Разница между первичным и вторичным токами всегда должна быть такой, чтобы обеспечить намагничивающий ток, необходимый для возбуждения основного потока, что предопределяет автоматическое увеличение  $i_1$  с ростом  $i_2$ .

В трансформаторах с развитым электромагнитным рассеянием, где падение напряжения на сопротивлении  $x_{1s}$  соизмеримо с величиной  $U_E = -E_1$ , рост тока нагрузки приводит к определенному снижению основного потока и намагничивающего тока.

Реальная картина электромагнитного поля трансформатора с развитым рассеянием (с разнесенными обмотками) схематически показана на рис. 2.2, б. При появлении тока  $i_2$  начинает сказываться его размагничивающее действие, которое заключается в том, что часть силовых линий потока, выходящего из зоны магнитопровода, связанной с первичной обмоткой ( $\Phi_1 - \Phi_2$ ), вытесняется из зоны магнитопровода, связанной со вторичной обмоткой. В результате при росте токов  $i_2$  и  $i_1$ , помимо некоторого снижения ЭДС  $E_1$ , обусловленного рассеянием первичной обмотки, вследствие снижения потока  $\Phi_2$  существенно уменьшаются ЭДС, наводимая во вторичной обмотке, и, следовательно, напряжение на нагрузке (сварочной дуге).

Однако анализ работы и расчет трансформатора упрощаются, если реальную картину поля заменить эквивалентной (см. рис. 2.2, в), которая строится в предположении, что главный поток, замыкаясь только по магнитопроводу, сцепляется со всеми витками первичной и вторичной обмоток. При этом имеют место два самостоятельных потока рассеяния  $\Phi_{1s}$  и  $\Phi_{2s}$ , причем поток  $\Phi_{2s}$  в магнитопровode условно направлен навстречу основному потоку. Тогда с учетом приведения ко вторичной цепи уравнения равновесия напряжений в трансформаторе запишутся в следующем виде:

$$\dot{U}'_1 = r'_1 \dot{I}'_1 + j\omega L'_{1s} \dot{I}'_1 + \dot{U}'_E;$$

$$\dot{E}_2 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_{2s} \dot{I}_2 + \dot{U}_d,$$

причем  $\dot{U}'_E = -\dot{E}'_1 = -\dot{E}_2$ ;  $\dot{I}'_{10} = \dot{I}'_1 - \dot{I}_2$ .

Этим уравнениям соответствуют схема замещения и векторная диаграмма, приведенные на рис. 2.3, б.

Если пренебречь током холостого хода, который составляет 5–7% от номинального первичного тока, можно составить упрощенные схему замещения и векторную диаграмму трансформатора (рис. 2.3, в). На схеме и диаграмме  $r = r'_1 + r_2$ ;  $x = x'_{1s} + x_{2s}$ ;  $I_2 = I'_1$ ;  $U_{20} = U'_1$ . Штриховой линией на диаграмме показан вектор  $U'_E$ . Основания перпендикуляров, опущенных из конца этого вектора на векторы  $I_2 x$  и  $I_2 r$ , показывают, как распределены активные и индуктивные падения напряжений между первичной и вторичной обмотками.

Векторные диаграммы (рис. 2.3, б, в) характеризуют работу трансформатора в одном определенном режиме нагрузки ( $U_d, I_2$ ).

О том, как меняются соотношения величин в трансформаторе при изменении нагрузки ( $U_d$ ) от холостого хода до короткого замыкания,

можно судить по круговой диаграмме, которая для упрощенной схемы замещения представлена на рис. 2.4.

При коротком замыкании ( $U_d = 0$ ;  $I_2 = I_{2к}$ ) активные падения напряжения в трансформаторе определяются вектором  $U_{2a} = U_{2к} = I_{2к} r$ , а реактивные – вектором  $U_{2p} = I_{2к} x$ . Эти векторы взаимно перпендикулярны и являются катетами прямоугольного треугольника с гипотенузой  $U_{20}$ .

При различных режимах нагрузки ( $U'_d, \dots, U''_d$ ) вершина треугольника перемещается по окружности  $I$ , которая является геометрическим местом концов векторов  $U_{2a} = U_d + I_2 r$ .

Геометрическим местом концов векторов  $U_d$  является окружность 2, эксцентрическая относительно окружности 1. При построении окружности 2 следует учитывать, что при холостом ходе  $U_d = U_{20}$  и, следовательно, окружность должна проходить через конец вектора  $U_{20}$ , а при коротком замыкании  $U_d = 0$  и  $U_{2a} = U_{2к}$  и, следовательно, окружность должна проходить через начало вектора  $U_{2к}$  и быть к нему касательной. Для соблюдения этих условий необходимо, чтобы ее центр  $O_2$  лежал на пересечении двух перпендикуляров: перпендикуляра к вектору  $U_{20}$ , проходящего через его середину, и перпендикуляра к вектору  $U_{2к}$ , восстановленного из его начала.

От окружности напряжений, построенной на векторе  $U_{20}$  как на диаметре, можно перейти к окружности токов 3. Диаметр этой окружности будет представлять собой вектор идеального тока короткого замыкания трансформатора  $I_{к0} = U_{20}/x$ . По фазе векторы токов совпадают с векторами напряжений дуги, а по значению могут быть найдены из соотношения  $I_2 = U_{2p}/x$ ; геометрическим местом концов векторов  $I_2$ , так же как и  $U_{2p}$ , является окружность.

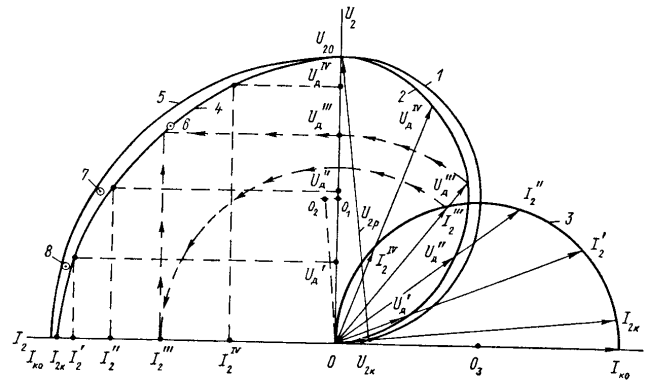


Рис. 2.4. Круговые диаграммы напряжений и токов и внешняя характеристика трансформатора

Каждому значению вектора тока  $I_2', \dots, I_2^{IV}$  соответствует определенное значение вектора напряжения дуги  $U_2', \dots, U_2^{IV}$ . Взяв численные значения этих векторов и перенеся их в координатную систему, по оси ординат которой отложены напряжения  $U_2$ , а по оси абсцисс — токи  $I_2$ , получим внешнюю характеристику трансформатора 4, соответствующую его некоторому индуктивному сопротивлению  $x$ . Для наглядности внешняя характеристика построена в свободном втором квадранте системы координат. Техника построения внешней характеристики видна из рис. 2.4 (см. точку  $U_2', I_2''$ ).

Кривая 5 является внешней характеристикой идеального трансформатора, у которого  $r = 0$ . Очевидно, что внешней характеристике такого трансформатора соответствует уравнение эллипса с полуосями  $U_{20}$ ,  $I_{k0}$ , и зависимость тока  $I_2$  от напряжения дуги  $U_2$  выражается соотношением

$$I_2 = I_{k0} \sqrt{1 - (U_2/U_{20})^2}.$$

На рис. 2.4 показаны точки б–д, полученные по уравнению

$$I_2 = I_{k0} \sqrt{1 - 1,17(U_2/U_{20})^2}.$$

Поправочный коэффициент 1,17 [20] учитывает, что при построении векторных и круговых диаграмм фактическое напряжение на дуге было заменено эквивалентной синусоидой.

Отметим, что внешняя характеристика, построенная на рис. 2.4, по форме идентична для любых конструкций трансформатора. При этом у трансформаторов с нормальным рассеянием, где номинальный ток  $I_{2ном}$  составляет 7–12% от тока  $I_{2к}$ , внешняя характеристика в зоне рабочих токов является жесткой. У трансформаторов с увеличенным рассеянием, где номинальный ток может составлять до 80% от  $I_{2к}$ , внешняя характеристика является падающей.

Регулирование тока в трансформаторах с механическим регулированием связано с изменением значения индуктивного сопротивления. Каждому значению  $x$  соответствует своя внешняя характеристика. В трансформаторах с электрическим регулированием внешняя характеристика является предельной естественной внешней характеристикой. Внутри зоны, ограниченной этой характеристикой, регулирование тока и формирование требуемых автоматических внешних характеристик источника производятся при помощи тиристорного или подмагничиваемого регулятора.

## 2.2. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К источникам тока с механическим регулированием относятся трансформаторы с подвижными обмотками, трансформаторы с подвижными магнитными шунтами и трансформаторы, работающие в комплексе с дополнительной реактивной катушкой-дресселем. Трансфор-

маторы с подвижными обмотками и шунтами относятся к группе трансформаторов с увеличенным (развитым) электромагнитным рассеянием. Трансформаторы, работающие в комплексе с дресселями, выполняются обычно с минимальным (нормальным) рассеянием.

Основной признак этой группы источников — наличие подвижных частей — является и основным ее недостатком. На подвижные части регулирующих устройств действуют электромагнитные силы, пульсирующие от нуля до максимума с двойной частотой сети; значение этих сил пропорционально квадрату тока и изменяется с изменением режима работы трансформатора. Электромагнитные силы вызывают вибрацию подвижных частей регулирующих устройств. Амплитуды колебаний зависят от массы подвижных частей, точности и качества сборки, жесткости крепления и других факторов. Даже при хорошей проработке конструкций и высоком качестве изготовления повышенные вибрации являются основной причиной, ограничивающей срок службы подобных источников.

Другим недостатком этих источников является инерционность регулирования и трудность осуществления дистанционного и программного управления, так как регулирование здесь производится вручную или при помощи сервоприводов.

Однако, несмотря на отмеченные недостатки, эти трансформаторы получили самое широкое распространение во всем мире как основной источник питания для ручной дуговой сварки штучными электродами из-за малого расхода активных материалов, высоких энергетических и сварочных показателей, простоты и дешевизны конструкций. До настоящего времени в ряде стран (Япония, ФРГ и др.) такие трансформаторы выпускаются и для автоматической сварки под флюсом. Однако в последние годы из-за ряда отмеченных недостатков, затрудняющих выполнение автоматической сварки, наметилась их замена более совершенными конструкциями.

## 2.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ С ПОДВИЖНЫМИ ОБМОТКАМИ

Трансформаторы с подвижными обмотками могут выполняться с магнитопроводами броневыми (рис. 2.5, а, б, в) и стержневыми (рис. 2.5, г) типов. Обмотки броневых трансформаторов бывают цилиндрическими или дисковыми, обмотки стержневого трансформатора, как правило, — только дисковыми.

Развитое магнитное рассеяние трансформаторов достигается за счет развитой проводимости между стержнями магнитной системы и расположения первичной 1 и вторичной 2 обмоток вдоль стержней 3 магнитопровода на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2.5).

Одна из обмоток трансформатора, обычно первичная, выполняется неподвижной, другая — подвижной. Перемещение подвижной обмотки осуществляется ходовым винтом. Реактивное (индуктивное) сопротивление трансформатора и, следовательно, сварочный ток изменяются

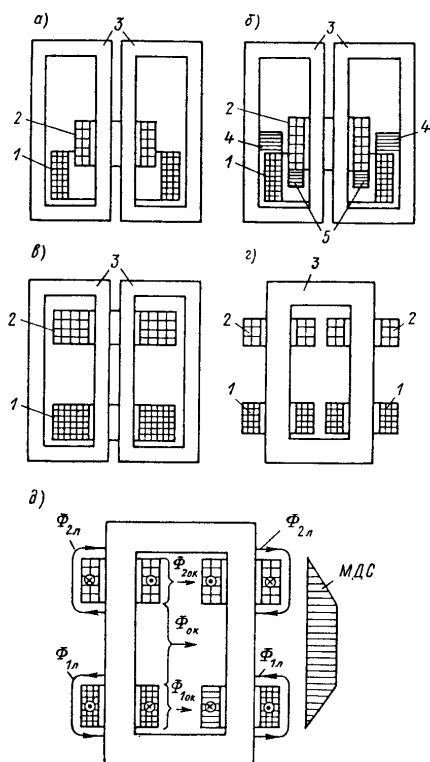


Рис. 2.5. Конструкции трансформаторов с подвижными обмотками и упрощенная картина поля рассеяния трансформатора

при изменении расстояния между обмотками. Полностью сдвинутым обмоткам соответствует минимальное индуктивное сопротивление и, следовательно, максимальный сварочный ток.

В трансформаторах бронзового типа с цилиндрическими катушками подвижная обмотка часто имеет меньшие радиальные размеры и может входить внутрь неподвижной обмотки (рис. 2.5, а, б). При увеличении расстояния между обмотками индуктивное сопротивление возрастает и сварочный ток падает. Для расширения пределов регулирования тока в отдельных конструкциях трансформаторов наряду с подвижной обмоткой используются небольшие магнитные шунты 4, 5 (рис. 2.5, б).

Когда подвижные шунты 5 совмещают с неподвижными 4, индуктивное сопротивление резко возрастает.

Расчеты и эксперименты показали, что все известные модификации трансформаторов бронзового типа уступают по удельным расходам активных материалов и по КПД трансформаторам стержневого типа [1, 24]. Поэтому трансформатор стержневой конструкции (рис. 2.5, в) получил самое широкое распространение в отечественных сварочных трансформаторах для ручной дуговой сварки. Эта же конструкция трансформатора с жестко закрепленными, но разнесенными относительно друг друга первичными и вторичными обмотками является основной как для трансформатора с магнитными шунтами, подвижными и управляемыми постоянным током, так и для ряда источников с тиристорным регулированием.

Для трансформатора с подвижными обмотками характерна некоторая зависимость напряжения холостого хода от расстояния между обмотками. При раздвижении обмоток вследствие роста потока рассеяния, замыкающегося по воздуху в окне между стержнями, напряжение холостого хода снижается на 3–6% относительно значения, получаемого при сдвинутых обмотках.

Следует отметить, что индуктивное сопротивление в зависимости от расстояния между обмотками изменяется по линейному закону и, следовательно, сварочный ток изменяется обратно пропорционально расстоянию между обмотками. При большом раздвижении обмоток эффективность регулирования тока снижается при непрерывном росте массы магнитопровода. Поэтому большой диапазон плавного регулирования в трансформаторах с подвижными обмотками нецелесообразен.

Для расширения пределов регулирования тока при ограничении массы магнитопровода применяется плавно-ступенчатое регулирование путем одновременного переключения числа витков первичной и вторичной обмоток с сохранением постоянства коэффициента трансформации или с некоторым его снижением в диапазоне малых токов.

Схемы трансформаторов с плавно-ступенчатым регулированием приведены на рис. 2.6, а, б, в. На рис. 2.6, г представлены регулировочные характеристики трансформаторов, т. е. зависимости вторичного (сварочного) тока от расстояния между обмотками  $I_2 = f(\xi)$ .

Необходимым условием плавно-ступенчатого регулирования является стыковка между двумя диапазонами тока. ГОСТ 95–77 допускает небольшой разрыв токов при переходе с одного диапазона на другой — не более 7,5%.

Две ступени регулирования для трансформатора по схеме рис. 2.6, а соответствуют параллельному или последовательному соединению катушек обмоток на разных стержнях. При этом напряжение холостого хода не изменяется, а индуктивное сопротивление обмоток изменяется в четыре раза. Регулировочные характеристики этого трансформатора для двух ступеней регулирования приведены на рис. 2.6, г (кривые 1 и 2). Чтобы получить стыковку между двумя диапазонами токов в этом трансформаторе, необходимо иметь кратность регулирования не менее 1



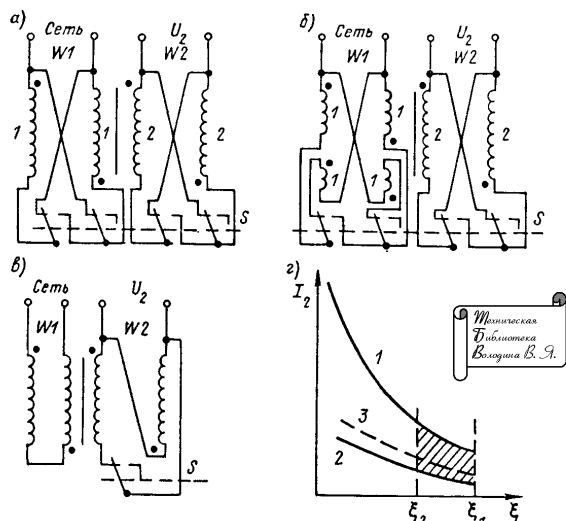


Рис. 2.6. Схемы трансформаторов с плавно-ступенчатым регулированием (а, б, в) и регулировочные характеристики трансформаторов (z)

к 4 в каждом диапазоне токов. При этом общая кратность регулирования тока составляет 1 к 16. Такое глубокое регулирование тока на практике не используется.

Для уменьшения высоты магнитопровода, массы и габаритов трансформатора в целом во ВНИИЭСО разработана схема трансформатора [2] (рис. 2.6, б) с частичным отключением витков катушек первичной обмотки при переходе с параллельного их соединения на последовательное. Напряжение холостого хода в диапазоне малых токов повышается, что благоприятно сказывается на стабильности горения дуги. На рис. 2.6, z регулировочные характеристики 1 и 3 соответствуют схеме трансформатора с частичным отключением витков.

Чтобы получить перекрытие ступеней токов, достаточно раздвигать обмотки на расстояние \$\xi\_2\$, а не на \$\xi\_1\$, как у трансформаторов по схеме рис. 2.6, а. Габариты магнитопровода при этом могут быть снижены на 20–25% пропорционально разности \$\xi\_1 - \xi\_2\$.

На рис. 2.6, в приведена схема трансформатора, в котором катушки первичной обмотки включены последовательно. Катушки вторичной обмотки на ступени больших токов включены параллельно, а при переходе на ступень малых токов одна катушка вторичной обмотки отключается. При этом в конкретных конструкциях трансформаторов

(переносные сварочные трансформаторы на токи 160 и 250 А) с учетом поля рассеяния, замыкающегося на металлический кожух, индуктивное сопротивление трансформатора изменяется примерно в два раза.

**Индуктивное сопротивление трансформатора.** При расчете сварочного трансформатора к числу основных исходных данных относятся пределы регулирования сварочного тока, которые непосредственно связаны с индуктивным сопротивлением трансформатора.

Максимальному сварочному току соответствует минимальное индуктивное сопротивление \$x\_{\min}\$ (обмотки полностью сдвинуты), минимальному сварочному току – максимальное \$x\_{\max}\$ (обмотки раздвинуты).

Рассмотрим картину магнитного поля рассеяния трансформатора стержневого типа (см. рис. 2.5, d): справа на рисунке показана эпюра магнитодвижущих сил трансформатора. Реальное поле рассеяния трансформатора можно представить как сумму трех составляющих: поля рассеяния в лобовых частях обмоток (\$\Phi\_{1л}, \Phi\_{2л}\$), поля рассеяния в окне трансформатора в зоне катушек (\$\Phi\_{1ок}, \Phi\_{2ок}\$) и поля рассеяния в зазоре между обмотками \$\Phi\_{ок}\$. Поле \$\Phi\_{ок}\$ уже при небольшом расстоянии от обмоток с большой степенью точности может быть представлено как плоскопараллельное поле, при этом можно считать, что магнитные силовые линии поля замыкаются по воздуху между стержнями магнитной системы в плоскостях, перпендикулярных осям стержней.

Магнитная проводимость \$\lambda\$ при \$\mu = 1\$ между стержнями магнитной системы, отнесенная к единице длины, определяется экспериментально и может быть представлена эмпирической зависимостью

$$\lambda = 1,5 + 1,2 \frac{b}{c_{ок}}$$

где \$b\$ – размер магнитопровода в направлении набора; \$c\_{ок}\$ – ширина окна магнитопровода.

В соответствии с картиной поля рассеяния индуктивное сопротивление трансформатора также может быть представлено как сумма трех составляющих:

$$x = x_{ок} + x_{л} + x_{\xi}$$

Составляющие \$x\_{ок}\$ и \$x\_{л}\$ не зависят от расстояния между обмотками и соответствуют магнитному полю в окне трансформатора (\$\Phi\_{1ок}, \Phi\_{2ок}\$) и в лобовых частях (\$\Phi\_{1л}, \Phi\_{2л}\$) при полностью сдвинутых обмотках (\$\xi = 0\$). Составляющая \$x\_{\xi}\$ соответствует магнитному полю в окне трансформатора в зазоре между обмотками и связана с расстоянием между обмотками \$\xi\$ прямо пропорциональной зависимостью.

Ниже приводятся формулы для расчета индуктивного сопротивления рассеяния, отнесенного ко вторичным обмоткам с числом витков \$w\_2\$ [22]. Формулы получены в предположении, что магнитная проницаемость магнитопровода бесконечна, отсутствует демпфирующее влияние вихревых токов, ток в витках распределен равномерно.

**Индуктивное сопротивление**

$$x_{ок} = \frac{1}{3} \omega \mu_0 w_2^2 \lambda (h_1 + h_2),$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $c^{-1}$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $h_1$  и  $h_2$  – высота катушек первичной и вторичной обмоток, м.

Индуктивное сопротивление

$$x_{л} = \frac{1}{2\pi} \omega \mu_0 w_2^2 l_{л} \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2},$$

где  $l_{л}$  – условная средняя длина витка катушек в лобовой части, м;  $g_1, g_2, g_{12}$  – средние геометрические расстояния, м.

Величины  $l_{л}$  и  $g_1, g_2, g_{12}$  определяются по следующим соотношениям:

$$l_{л} = (l_{1cp} + l_{2cp})/2,$$

где  $l_{1cp}, l_{2cp}$  – средняя длина витка катушек первичной и вторичной обмоток, м;

$$g_1 = 0,223(2c_1 + h_1); g_2 = 0,223(2c_2 + h_2),$$

где  $c_1, c_2$  – размеры катушек по ширине вне окна магнитопровода с учетом вентиляционных каналов и каналов между катушками и магнитопроводом, м;

$$g_{12} = 2c_{cp} [0,22 + 0,75h_{cp}/(2c_{cp})] \text{ при } 1 < 2c_{cp}/h_{cp} < \infty,$$

где

$$c_{cp} = (c_1 + c_2)/2; h_{cp} = (h_1 + h_2)/2.$$

Индуктивное сопротивление

$$x_{\xi} = \omega \mu_0 w_2^2 \lambda \xi.$$

При расчете минимального индуктивного сопротивления трансформатора  $x_{\min}$  (при полностью сдвинутых обмотках) составляющая  $x_{\xi}$  определяется с учетом минимального расстояния между обмотками, необходимого по конструктивным соображениям. Максимальное индуктивное сопротивление  $x_{\max}$  рассчитывается при максимальном расстоянии между обмотками.

Приведенные соотношения соответствуют параллельному включению обмоток трансформатора. При переходе к последовательному соединению ( $w'_2 = 2w_2$ ) индуктивное сопротивление возрастает в четыре раза.

Элементы расчета трансформатора. Исходными данными при расчете являются расчетная мощность трансформатора, продолжительность нагрузки, номинальный ток и пределы его регулирования, номинальное рабочее напряжение, напряжение холостого хода и тепловой режим, на который рассчитывается трансформатор (класс изоляции обмоток).

В последние годы созданы методики машинного расчета оптимальной геометрии трансформатора с учетом его регулировочных свойств, однако эти методики еще несовершенны, так как не учитывают постоянство теплового режима для всех

рассчитываемых вариантов. Поэтому до настоящего времени расчет ведется методом последовательных приближений. Предварительно определяются основные геометрические размеры трансформатора, а потом производится поверочный расчет всех заданных величин, и в первую очередь индуктивного сопротивления; затем уточняются геометрические размеры и т. д.

При плавно-ступенчатом регулировании тока производится для обеих ступеней (диапазонов).

Расчет выполняется в следующем порядке:

1. Минимальное и максимальное индуктивные сопротивления, обеспечивающие заданные пределы регулирования:

$$x_{\min} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{22}^2}}{I_{22}}; x_{\max} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{21}^2}}{I_{21}},$$

где  $I_{22}$  и  $I_{21}$  – максимальный и минимальный ток нагрузки;  $U_{22}$  и  $U_{21}$  – рабочие напряжения, соответствующие токам нагрузки  $I_{22}$  и  $I_{21}$ , определяемые, например, по формуле  $U_2 = 20 + 0,04 I_2$  в вольтах.

2. Числа витков обмоток. В сварочном трансформаторе выбор числа витков обмоток имеет принципиальное значение, так как витки определяют пределы регулирования сварочного тока. Для выбора числа витков обмоток  $w_1, w_2$  рекомендуется пользоваться эмпирической зависимостью параметра  $e_w$  (в вольтах на виток) от расчетной мощности трансформатора (в киловольт-амперах), приведенной к длительному по нагреву току трансформатора:

$$e_w = 0,55 + 0,095 P_{дл}.$$

Эта зависимость справедлива для широкого диапазона мощностей, однако наибольшую сходимость результатов дает в диапазоне 5–30 кВ·А.

Мощность в киловольт-амперах

$$P_{дл} = U_{20} I_{2ном} \sqrt{\frac{ПН}{100}} \cdot 10^{-3},$$

где  $I_{2ном}$  – номинальный вторичный ток, А; ПН – продолжительность нагрузки, %.

Числа витков обмоток:

$$w_1 = U_1/e_w; w_2 = U_{20}/e_w.$$

3. Числа витков катушек. При параллельном соединении катушек  $w_{1к} = w_1$ ;  $w_{2к} = w_2$ .

4. Номинальный ток-первичной обмотки в амперах

$$I_{1ном} = \frac{I_{2ном} K_{\mu}}{n},$$

где  $K_{\mu} = 1,05 \dots 1,1$  – коэффициент, учитывающий намагничивающий ток трансформатора;  $n$  – коэффициент трансформации.

5. Сечение стали сердечника трансформатора в квадратных сантиметрах

$$S_c = U_{20} \cdot 10^4 / (4,44 f w_2 B_m),$$

где  $B_m$  – индукция в сердечнике, Тл. Для холоднокатаной стали индукция может быть принята равной  $B_m = 1,6 \dots 1,7$  Тл.

6. Конструктивные размеры трансформатора. Расчет конструктивных размеров приводится применительно к стержневой конструкции, эскиз которой дан на рис. 2.7. Далее все линейные размеры даны в миллиметрах, сечения – в квадратных миллиметрах.

1) Ширина пластины стержня  $a$  и ширина окна  $c_{ок}$  магнитопровода:

$$a = \sqrt{\frac{S_c \cdot 10^2}{p_1 k_c}}; \quad c_{ок} = b/p_2,$$

где  $p_1 = b/a = 1,8 \dots 2,2$ ;  $p_2 = 1,0 \dots 1,2$ ;  $k_c = 0,95 \dots 0,97$  – коэффициент заполнения стали;  $b$  – высота набора магнитопровода.

Указанные значения коэффициентов  $p_1, p_2$  рекомендуются для трансформаторов на токи 315–500 А.

2) Сечения обмоточных проводов (для параллельного соединения катушек):

$$q_1 = I_{1ном} / (2J_1); \quad q_2 = I_{2ном} / (2J_2).$$

Для трансформаторов на ток до 500 А класса изоляции Н для ручной дуговой сварки, изготовленных из алюминиевого провода, могут быть рекомендованы следующие значения плотностей тока:  $J_1 = 2,4 \dots 2,8$  А/мм<sup>2</sup>;  $J_2 = 2,1 \dots 2,3$  А/мм<sup>2</sup>. Нижние значения  $J_1$  и  $J_2$  соответствуют трансформаторам большей мощности. Для первичной обмотки обычно используется провод марки АПСД, для вторичной – голая шина марки АДО.

3) Размеры провода, выбираемые исходя из требуемых сечений или технических условий:  $a_{1п}, b_{1п}$  – ширина и высота провода первичной обмотки;  $a_{2п}, b_{2п}$  – то же для вторичной обмотки;  $a'_{1п}, b'_{1п}, a'_{2п}, b'_{2п}$  – то же в изоляции.

Высоту провода следует выбирать возможно меньшей, так как добавочные потери в обмотках от потоков магнитного рассеяния трансформатора пропорциональны четвертой степени высоты провода.

4) Конструктивно-крепежные размеры (рис. 2.7):

изоляционные расстояния катушек в окне от магнитопровода  $\delta_1 = 5 \dots 10$ ; верхнее значение соответствует подвижной обмотке; ширина вентиляционных каналов в обмотках  $\delta_2 = 10 \dots 13$ ;

ширина прокладки между катушками первичной обмотки  $\delta_3 = 1,5 \dots 2,0$ ; размеры крепежных изоляционных деталей первичной обмотки  $\delta_4 = \delta_5 = 10$ ; то же для вторичной обмотки  $\delta_6 = \delta_7 = 10 \dots 13$ .

5) Размеры катушки первичной обмотки:

ширина катушки

$$m_{1к} = (c_{ок} - 2\delta_1 - \delta_3)/2;$$

число слоев в катушке

$$n_{1сл} = m_{1к} / [(a'_{1п} + k_n) k_y],$$

где  $k_n = 0,15$  мм – толщина межслоевой изоляции;  $k_y = 1,1$  – коэффициент, учитывающий неплотность укладки проводников;

число витков в слое

$$w_{1сл} = w_{1к} / n_{1сл};$$

высота первичной катушки

$$h_1 = w_{1сл} b'_{1п} k_y.$$

Если трансформатор изготавливается по схеме рис. 2.6, б, то между основной частью первичной катушки и отключаемой частью необходимо проложить усиленную изоляцию – поставить три прокладки по 0,15 мм.

6) Размеры катушки вторичной обмотки. Вторичная обмотка наматывается "на ребро" голой алюминиевой шиной марки АДО. Выбор размера шины и внутреннего радиуса намотки "на ребро" производится из условия, что относительное удлинение волокон шины по наружному радиусу должно быть не более 30%, в противном случае могут появиться разрывы шины при намотке.

Высота катушки

$$h_2 = w_{2к} b'_{2п} k_y.$$

7) Высота окна магнитопровода

$$h_{ок} = \delta_4 + h_1 + \xi_{max} + h_2 + \delta_7.$$

Величина  $\xi_{max}$  определяется в процессе поверочного расчета индуктивного сопротивления трансформатора.

Поверочный расчет трансформатора производится по приведенным ранее формулам. Пример расчета основных геометрических размеров трансформатора дан в приложении.

7. Полный тепловой расчет может быть выполнен по известным методикам расчета силовых трансформаторов.

## 2.4. ТРАНСФОРМАТОРЫ С ПОДВИЖНЫМИ МАГНИТНЫМИ ШУНТАМИ

Трансформаторы с развитым магнитным рассеянием и подвижными магнитными шунтами выполняются на магнитопроводах стержневого типа и имеют дисковые обмотки.

Обмотки трансформатора (рис. 2.8, а, б) расположены симметрично на двух стержнях магнитопровода 3. В канале между первичными 1 и вторичными 2 обмотками расположен магнитный шунт 4. Между шунтом и стержнями сердечника имеются воздушные зазоры б.

Возможны два варианта взаимного расположения первичной и вторичной обмоток относительно шунта, а именно полное или частичное разнесение. При полном разнесении первичные и вторичные обмотки

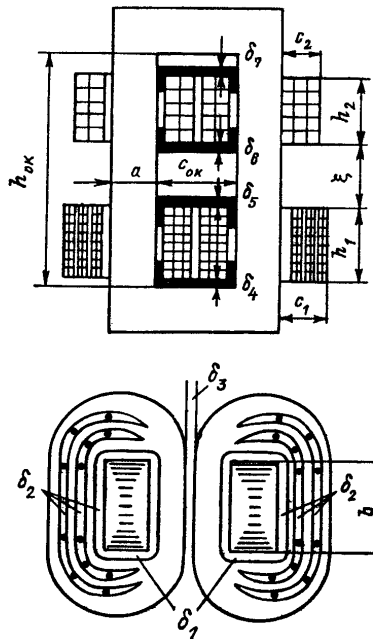


Рис. 2.7. К расчету геометрических размеров трансформатора

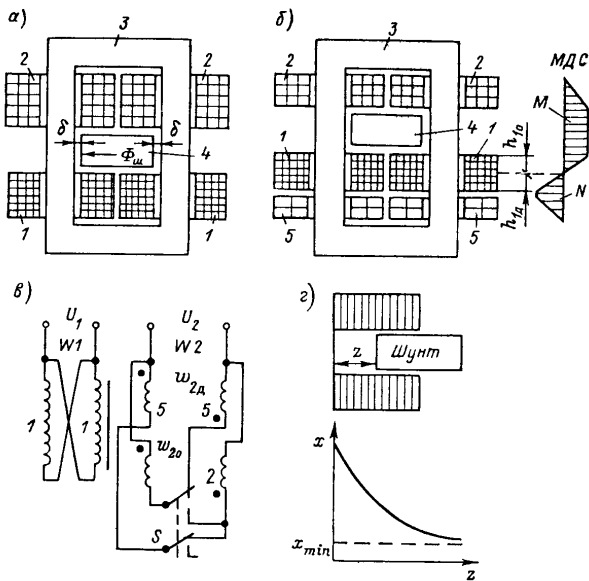


Рис. 2.8. Конструкции трансформаторов с магнитными шунтами и схемы соединения обмоток

расположены по разные стороны шунта (рис. 2.8, а). При частичном разнесении (рис. 2.8, б) вторичная обмотка состоит из двух секций — основной 2 с числом витков  $w_{20}$  и дополнительной 5 с числом витков  $w_{2д}$ , причем дополнительная обмотка расположена в зоне первичной обмотки 1 и имеет с ней хорошую электромагнитную связь. Справа на рис. 2.8, б представлена эпюра магнитодвижущих сил такого трансформатора.

Как показывает опыт, трансформатор с полностью разнесенными обмотками целесообразно выполнять только на небольшие мощности — на токи до 200–250 А. Для дальнейшего увеличения тока приходится снижать числа витков первичных и вторичных обмоток. При этом нарушается оптимальное соотношение расхода обмоточных материалов и стали, трансформатор становится «стальным», его масса растет.

Дополнительные витки вторичной обмотки незначительно увеличивают индуктивное сопротивление трансформатора и позволяют создать оптимальную по массе и пределам регулирования конструкцию [18].

В трансформаторах с частичным разнесением обмоток для получения двух диапазонов регулирования обычно изменяют степень разнесе-

ния обмоток. Полному разнесению обмоток соответствует диапазон малых токов. При переходе на диапазон больших токов включается обмотка с числом витков  $w_{2д}$  и отключается часть обмотки  $w_{20}$ .

Новая, наиболее рациональная схема соединения обмоток представлена на рис. 2.8, в. Диапазону больших токов соответствует параллельное соединение катушек вторичной обмотки. При переходе на диапазон малых токов дополнительные катушки 5 отключаются, а основные катушки 2 включаются последовательно; переход на диапазон малых токов сопровождается увеличением напряжения холостого хода. При переходе с одного диапазона токов на другой в трансформаторе с шунтом не требуется переключения витков первичной обмотки, что положительно сказывается на надежности трансформатора.

Плавное регулирование тока в трансформаторе осуществляется перемещением магнитного шунта вручную или сервоприводом. При полностью вставленном в окно шунте магнитная проводимость для потока рассеяния и, следовательно, индуктивное сопротивление трансформатора максимальны, сварочный ток при этом минимален. При выдвигании шунта из окна магнитопровода магнитная проводимость уменьшается и сварочный ток растет.

Зависимость индуктивного сопротивления  $x$  от положения шунта показана на рис. 2.8, г. Скорость снижения  $x$  при выдвигании шунта вначале постоянна, а затем уменьшается, стремясь к нулю. При выходе шунта за пределы окна магнитопровода изменение  $x$  относительно невелико.

Магнитный шунт при выходе из окна магнитопровода испытывает максимальное осевое электромагнитное усилие, стягивающее шунт в окно магнитопровода и вызывающее его вибрацию. Для снижения вибрации применяются тугие направляющие, по которым перемещается шунт, или шунт снабжают пружинами, отжимающими его к одной стороне магнитопровода или устанавливающими его в окне с некоторым перекосом.

Вибрация магнитного шунта значительно уменьшается, если его разделить на две равные части и регулирование тока производить, выдвигая части шунта из окна в противоположные стороны. В этом случае осевые усилия, действующие на шунты, направлены навстречу друг другу.

**Индуктивное сопротивление трансформатора.** Трансформатор с выдвинутым магнитным шунтом почти полностью аналогичен трансформатору с подвижной обмоткой.

Однако наличие выдвинутого магнитного шунта несколько влияет на характер поля рассеяния, в результате чего индуктивное сопротивление такого трансформатора на 20–30% выше, чем у подобного трансформатора с разнесенными обмотками без шунта.

Минимальное индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_{\min} = (1,2 \dots 1,3) (x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi_1}),$$

где  $\xi_1$  — расстояние между обмотками.

Максимальное индуктивное сопротивление складывается из двух составляющих, соответствующих магнитным потокам рассеяния по воздуху  $x'_{\text{min}}$  и через шунт  $x_{\text{ш}}$ .

Составляющая

$$x'_{\text{min}} = x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi_2},$$

где  $\xi_2$  — усредненное расстояние от обмоток до шунта.

Составляющая

$$x_{\text{ш}} = k_{\text{в}} \omega \mu_0 w_2^2 S_{\text{ш}} / (2\delta),$$

где  $k_{\text{в}} = 1,1$  — коэффициент, учитывающий "выпучивание" магнитного потока шунта;  $S_{\text{ш}}$  — площадь поперечного сечения магнитного шунта,  $\text{м}^2$ ;  $\delta$  — величина зазора между шунтом и сердечником,  $\text{м}$ .

Минимальное индуктивное сопротивление рассеяния  $x_{\text{min}}$  трансформатора с частично разнесенными обмотками складывается из двух составляющих  $x_{\text{min o}}$  и  $x_{\text{min д}}$ , обусловленных взаимодействием первичной обмотки с основной и дополнительной вторичными обмотками (группы катушек, создающие МДС  $M$  и  $N$ , — рис. 2.8, б).

При определении  $x_{\text{min o}}$  в приведенные ранее формулы для трансформатора с подвижной обмоткой следует подставить число витков  $w_{2o}$ , высоты катушек — основной обмотки  $h_{2o}$  и части первичной обмотки  $h_{1o} = h_1 \frac{w_{2o}}{w_2}$ , а также учесть расстояние между обмотками 1 и 2.

При определении  $x_{\text{min д}}$  учитываются число витков  $w_{2д}$ , высоты катушек  $h_{2д}$  и  $h_{1д} = h_1 \frac{w_{2д}}{w_2}$  и зазор между обмотками 1 и 5.

При расчете индуктивного сопротивления  $x_{\text{ш}}$  в приведенную формулу следует подставить  $w_{2o}$ .

Трансформаторы с подвижными шунтами, выполненные по схеме рис. 2.8, в, не уступают по массе и энергетическим показателям трансформаторам с подвижными обмотками. Эти трансформаторы не имеют узла низкой надежности — переключателя в первичной цепи. Однако они не нашли у нас широкого распространения из-за несколько большей трудоемкости их изготовления.

## 2.5. ТРАНСФОРМАТОРЫ С ДРОССЕЛЯМИ С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

Дроссели обычно устанавливаются во вторичных цепях силового трансформатора. Трансформатор, работающий в комплекте с дросселем, является обычным понижающим силовым трансформатором с нормальным рассеянием и имеет жесткую внешнюю характеристику.

Регулирование индуктивного сопротивления дросселя, а следовательно, и сварочного тока принципиально может осуществляться ступенчато — изменением числа витков обмотки (рис. 2.9, а) и плавно — изменением величины воздушного зазора в магнитопроводе дросселя (рис. 2.9, б).

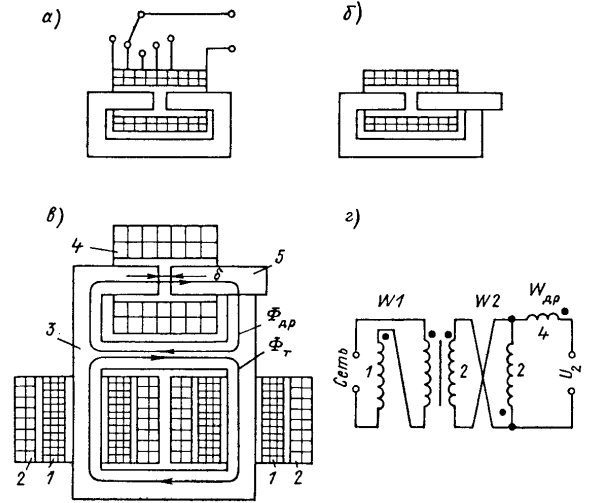


Рис. 2.9. Трансформатор с дросселем с воздушным зазором

Регулирование по первому способу, несмотря на сравнительно более высокую надежность, практического применения не нашло. Это связано с необходимостью большого числа отводов на обмотке для плавного регулирования и с плохим использованием активных материалов дросселя при данном способе регулирования. В номинальном режиме работы дроссель рассчитан на неполное число витков и уменьшение тока осуществляется введением дополнительных витков, вызывающих рост расчетной мощности дросселя.

Регулирование по второму способу имело у нас ранее достаточно широкое распространение. Дроссель с регулируемым воздушным зазором выполняется отдельно на собственном магнитопроводе или совместно с трансформатором на общей магнитной системе. Трансформатор (рис. 2.9, в, г) содержит первичную обмотку 1, вторичную обмотку 2, магнитопровод 3, обмотку дросселя 4 и подвижный пакет дросселя 5. Обычно обмотку дросселя  $W_{\text{др}}$  (рис. 2.9, г) включают встречно со вторичной обмоткой трансформатора  $W_2$ . При нагрузке поток обмотки дросселя  $\Phi_{\text{др}}$  в среднем ярме направлен встречно потоку  $\Phi_{\text{т}}$  трансформатора. Индукция и потери в среднем ярме при таком соединении уменьшаются, появляется возможность несколько снизить его сечение по сравнению с нижним ярмом.

Регулирование тока в трансформаторе производится подвижным пакетом дросселя. С увеличением воздушного зазора  $\delta$  индуктивное

ТРАНСФОРМАТОРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

3.1. МАГНИТНОЕ И ТИРИСТОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Для бесконтактного электрического регулирования напряжения и тока в сварочных трансформаторах могут использоваться тиристорные или магнитные регуляторы.

Основное преимущество таких регуляторов — отсутствие подвижных частей и, как следствие, высокая надежность и долговечность. Как тиристорные, так и магнитные устройства осуществляют фазовое регулирование мгновенного, действующего и среднего значений напряжения нагрузки. При этом в зависимости от принятых схемных решений форма тока в нагрузке может иметь импульсный, прерывистый характер с бестоковыми паузами или непрерывную, практически прямоугольную форму.

На рис. 3.1 приведены схемы источников на основе простейших магнитных и тиристорных регуляторов. В схемах магнитного регулирования (рис. 3.1, а, в) применен дроссель насыщения ДН, на двух магнитопроводах которого размещены рабочие обмотки  $W_{p1}$ ,  $W_{p2}$ ; обмотка управления  $W_y$  охватывает одновременно оба магнитопровода. Рабочие обмотки дросселя ДН включены встречно-последовательно, чтобы ЭДС основной частоты, наводимые в обмотке управления, взаимно компенсировались. Однако при наличии тока управления  $i_y$  в обмотке  $W_y$  наводится ЭДС двойной частоты  $e_{2\omega}$  с амплитудой  $E_{2\omega m} = U_{2m} \frac{w_y}{w_p}$ , где  $w_p = w_{p1} + w_{p2}$ . В схеме рис. 3.1, а дроссель ДН работает в режиме "свободного" намагничивания [28]: сопротивление в его цепи управления настолько мало, что не влияет на гармоническую составляющую тока  $i_y$ , возникающую в цепи управления под действием ЭДС  $e_{2\omega}$ .

В схеме рис. 3.1, в дроссель ДН работает в режиме "вынужденного" намагничивания. В его цепи управления установлен дроссель  $L$ , подав-

сопротивление трансформатора снижается и сварочный ток растет. В результате действия электромагнитных сил подвижный пакет дросселя подвержен вибрациям, особенно значительным при малом зазоре  $\delta$ . Вибрации могут вызывать поломки в подвижном механизме, а также нарушение изоляции обмоток.

Масса таких трансформаторов существенно больше, чем трансформаторов с подвижными обмотками и подвижными шунтами. Выпуск их в настоящее время во всем мире практически прекращен.

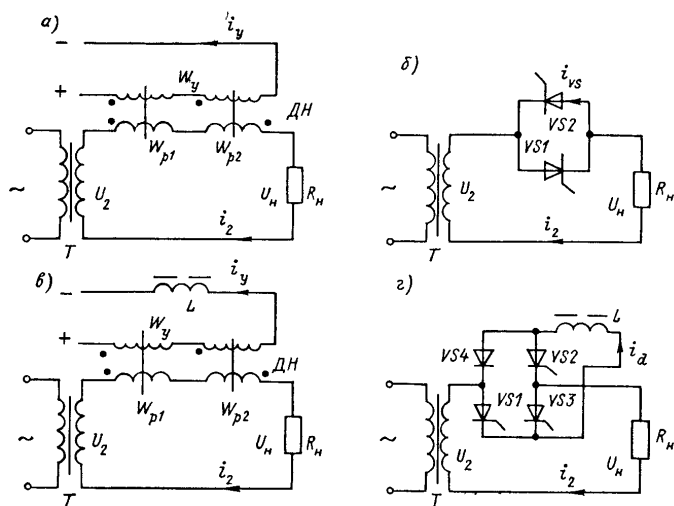


Рис. 3.1. Схемы источников тока на основе магнитных и тиристорных регуляторов

ляющий полностью или частично гармоническую составляющую тока  $i_y$ . В схеме тиристорного регулирования (рис. 3.1, б) тиристоры включены встречно-параллельно, в схеме рис. 3.1, в — по мостовой схеме, при этом в цепи выпрямленного тока  $i_d$  включен дроссель  $L$ , подавляющий гармоническую составляющую тока.

Схемы рис. 3.1, а, б относятся к схемам источников прерывистого тока нагрузки, а схемы рис. 3.1, в, г — к схемам источников непрерывного тока прямоугольной формы. Если полагать источники идеальными, т. е. пренебречь рассеянием и активными потерями в силовом трансформаторе  $T$ , дросселях ДН и  $L$ , током холостого хода дросселя ДН, током утечки и потерями в тиристорах, то можно считать, что процессы регулирования напряжения и тока нагрузки в источниках с магнитным и тиристорным регулированием практически идентичны и, следовательно, схему рис. 3.1, а можно принять аналогом схемы рис. 3.1, б, а схему рис. 3.1, в — аналогом схемы рис. 3.1, г.

Преимуществами магнитных регуляторов над тиристорными является простота, высокая надежность и отсутствие в схемах силовых полупроводниковых приборов. Недостатки — большой расход активных материалов, низкий КПД и инерционность регулирования.

В связи с совершенствованием силовой полупроводниковой техники магнитные регуляторы (известные в литературе как дроссели насыщения и подмагничиваемые трансформаторы [28, 7]), ранее широко использовавшиеся в отечественных и зарубежных источниках для арго-

нодуговой сварки и сварки под флюсом, практически полностью вытеснены тиристорными регуляторами, позволяющими наиболее просто и экономно решать задачи стабилизации, программирования и дистанционного регулирования режима сварки, формирования требуемых внешних характеристик, ограничения напряжения холостого хода, управления значением постоянной составляющей сварочного тока. Поэтому далее будем рассматривать только тиристорные устройства. Одна конструкция подмагничиваемого трансформатора, получившего распространение в отечественных промышленных сварочных установках [11], будет рассмотрена в главе пятой при описании этих установок.

По причинам, изложенным ниже, устройства с прямоугольной формой тока получили распространение в установках для аргонодуговой сварки и называются источниками с прямоугольной формой тока. Устройства с прерывистым регулированием тока получили распространение при ручной дуговой сварке и автоматической сварке под флюсом и обычно называются тиристорными трансформаторами.

### 3.2. Источники с прямоугольной формой тока

Рассмотрим работу тиристорного источника, выполненного по схеме рис. 3.1, г.

Процессы в идеальном источнике. Сначала полагаем, что индуктивное сопротивление дросселя  $X_L \rightarrow \infty$ ; выпрямленный ток  $i_d$  при этом полностью сглажен. Линейные диаграммы напряжений и токов для активной нагрузки при трех углах регулирования приведены на рис. 3.2. На рис. 3.2, а представлены напряжения питания  $u_2$  и нагрузки  $u_n$  (ось 1), напряжения на выходе выпрямителя  $u_d$  и на дросселе  $u_L$  (ось 2), выпрямленный ток  $i_d$  и токи тиристоров  $i_{1,2}$  и  $i_{3,4}$  (ось 3), ток нагрузки  $i_2$  (ось 4). Штриховыми линиями на осях 3, 4 показаны значения токов  $i_d$  и  $i_2$  при конечном значении индуктивного сопротивления дросселя  $L$ .

Рассмотрение начнем с режима (рис. 3.2, а), близкого к короткому замыканию, когда среднее за полупериод значение напряжения нагрузки  $U_n \rightarrow 0$ . Очевидно, что для этого режима применимы все соотношения, справедливые для мостового выпрямителя, работающего на чисто индуктивную нагрузку.

Напряжение

$$U_n = 2\sqrt{2} \cdot U_2 / \pi \cos \varphi = U_{2cp} \cos \varphi,$$

где  $U_{2cp}$  — среднее за полупериод вторичное напряжение трансформатора;  $\varphi$  — угол включения тиристоров.

Для этого режима ( $U_n \rightarrow 0$ ,  $\varphi \rightarrow \pi/2$ ) тиристоры  $VS1, VS2$  (см. рис. 3.1, г) вступают в работу при углах  $\varphi \approx \pi/2$  и будут проводить ток  $i_d$  до момента  $\pi + \varphi$  (рис. 3.2, а), когда произойдет мгновенная коммутация и в работу вступят тиристоры  $VS3, VS4$ . В период работы одной группы тиристоров ( $VS1, VS2$ ) напряжение на выходе выпрямителя изменяется по закону косинуса  $u_d = \sqrt{2} \cdot U_2 \cos \omega t$ , причем в интервале

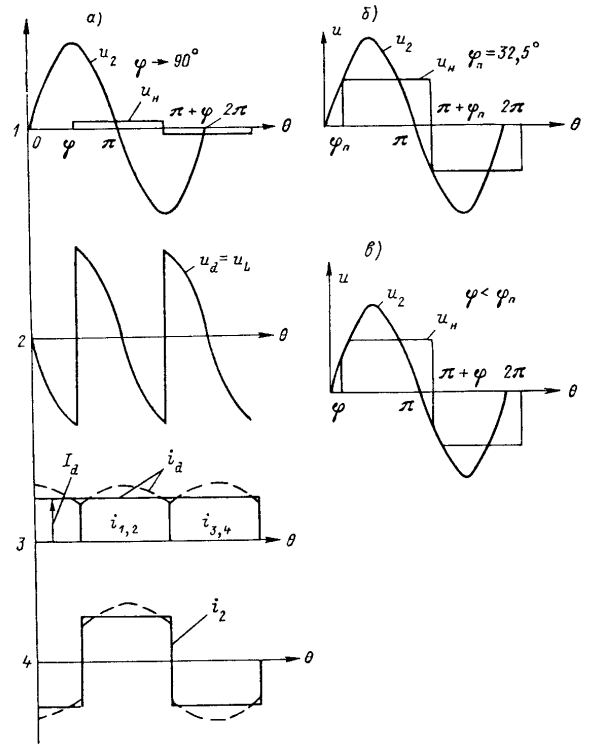


Рис. 3.2. Диаграммы напряжений и токов для трех углов регулирования

$\varphi \dots \pi$  оно имеет положительное, а в интервале  $\pi \dots (\pi + \varphi)$  — отрицательное значение. В этом интервале постоянство тока  $i_d$  поддерживается энергией, запасенной в дросселе  $L$ . В момент  $\pi + \varphi$ , когда вступят в работу тиристоры  $VS3, VS4$ , напряжение  $u_d$  скачкообразно изменит свой знак. Это напряжение в режиме короткого замыкания практически полностью прикладывается к дросселю ( $u_L \approx u_d$ ). Ток нагрузки  $i_2$  имеет прямоугольную форму, напряжение на активной нагрузке  $u_n$  повторяет форму тока нагрузки. Очевидно, что коэффициенты формы и амплитуды тока и напряжения нагрузки равны единице.

При уменьшении угла включения от значения, соответствующего режиму короткого замыкания ( $\varphi \approx \pi/2$ ), до некоторого предельного угла  $\varphi_n$  напряжение на нагрузке возрастает, сохраняя прямоугольную

форму. Начиная с угла  $\varphi_n$  (рис. 3.2, б) должен происходить переход напряжения нагрузки  $u_n$  и тока  $i_2$  от прямоугольной к синусоидальной форме. Ток  $i_2$  при изменении полярности не может мгновенно увеличиться выше значения  $i_2 = u_n/R_n$ . Следовательно, предельное значение  $\varphi_n$ , при котором возможна прямоугольная форма напряжения, определяется из выражения  $u_n = U_n = \sqrt{2} \cdot U_2 \sin \varphi_n$ . С другой стороны, как было приведено выше,  $U_n = 2\sqrt{2} \cdot U_2 / \pi \cos \varphi$ . Следовательно,  $\varphi_n = \arctg \frac{2}{\pi} = 32,5^\circ$ . Предельное значение напряжения нагрузки, при котором еще сохраняется прямоугольная форма тока,  $U_{n,п} = 0,844 U_{2,ср}$ . На рис. 3.2, в показан режим перехода к синусоидальному току при  $\varphi < \varphi_n$ .

Таким образом, устройство позволяет регулировать напряжение нагрузки в широком диапазоне — от 0 до  $0,844 U_{2,ср}$  при сохранении прямоугольной формы тока. Этот диапазон значительно перекрывает зону сварочных режимов. В частности, при аргонодуговой сварке  $U_d = (0,2 \dots 0,25) U_{2,ср}$ .

Работа реального источника. Отличие режимов работы реальных источников от режимов работы идеальных связано с двумя основными причинами: наличием рассеяния силового трансформатора и конечным значением индуктивности сглаживающего дросселя. Первой причиной можно практически пренебречь, если в схеме использовать силовой трансформатор с минимальным рассеянием.

Конечное значение индуктивного сопротивления  $x_L$  дросселя обуславливает наличие в токах  $i_d$  и  $i_2$  гармонических составляющих. В режиме короткого замыкания  $u_L$  имеет наибольшее значение и изменяется по закону косинуса (рис. 3.2, а). Гармонические составляющие токов под действием  $u_L$  изменяются в каждый полупериод по синусоидальному закону

$$i_{d\sim} = |i_{2\sim}| = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{x_L} \sin \theta = I_{2m\sim} \sin \theta.$$

Полный ток  $i_2$  за полупериод

$$i_2 = I_{2,ср} - 2I_{2m\sim}/\pi + I_{2m\sim} \sin \theta.$$

Отметим, что путем соответствующего выбора значения индуктивного сопротивления дросселя ( $x_L = 2\sqrt{2} \cdot U_2 / \pi I_{2,ср}$ ) можно создать источники с чисто синусоидальной формой тока. Расчеты и эксперименты показали, что масса дросселя в источниках синусоидального тока соизмерима с массой силового трансформатора.

Для получения благоприятной для сварки прямоугольной формы тока с малой гармонической составляющей масса дросселя должна превышать массу силового трансформатора.

Соотношение переменных и постоянных составляющих тока можно выразить через коэффициент пульсаций

$$\beta_i = \frac{I_{2m\sim}}{2I_{2,ср}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2I_{2,ср} x_L}.$$

Очевидно, что в процессе регулирования тока для сохранения коэффициента формы тока неизменной ( $\beta_i = \text{const}$ ) необходимо поддерживать постоянным произведение  $I_{2,ср} x_L$ . Для этого дроссель следует выполнять нелинейным. Для снижения величины  $\beta_i$ , т. е. приближения формы тока к прямоугольной, в диапазоне малых сварочных токов без увеличения массы дросселя его обмотку можно выполнять секционированной и предусмотреть две ступени индуктивности, например, за счет переключения секций обмотки с параллельного соединения на последовательное.

Несмотря на значительную массу и необходимость применения двойного комплекта тиристоров, источники с прямоугольной формой тока широко используются в отечественных и зарубежных установках для аргонодуговой сварки, где требования к форме тока весьма жестки. В таких источниках не требуется применения специальных мер для подавления постоянной составляющей тока, которая компенсируется автоматически за счет некоторой задержки включения тиристоров в полупериоды прямой полярности. Очевидно, что на основе рассмотренной схемы легко выполнить и комбинированные источники постоянного и переменного тока. Такие источники для аргонодуговой сварки выпускаются отечественной промышленностью и будут рассмотрены в главе пятой.

Для сварки плавящимся электродом (ручной и автоматической) такие источники промышленного применения не получили. Это связано, наряду с повышенным расходом материалов, с большой инерционностью изменения сварочного тока, что неблагоприятно сказывается на процессах переноса электродного металла.

### 3.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ ПРЕРЫВИСТОГО ТОКА

Схема простейшего тиристорного трансформатора (ТТ) прерывистого тока представлена на рис. 3.1, б. Основными элементами этой схемы являются фазорегулятор (ФР) на тиристорах  $VS1, VS2$  и силовой трансформатор  $T$ .

Способ фазового регулирования основан на преобразовании синусоидального тока в знакопеременные импульсы, амплитуда и длительность которых определяются углом включения тиристоров. До недавнего времени этот способ регулирования при дуговой сварке считался неприемлемым, поскольку в паузы между импульсами тока происходит быстрая деионизация дугового промежутка, затрудняющая повторные возбуждения дуги.

Особенно большие паузы имеют место в устройствах, близких к идеальным, где используется силовой трансформатор с минимальным рассеянием.



Таблица 3.1

$\varphi, \dots^\circ$	$\frac{U_{н.ср}}{U_{2ср}}$	$\frac{U_{н.ср}}{U_2}$	$\frac{U_{н.д}}{U_2}$	$k_\phi$	$\frac{U_{вмпр}}{U_{2m}} = \frac{U_{вмобр}}{U_{2m}}$	$\frac{I_{в.ср}}{I_{вт}}$	$\frac{I_{в.д}}{I_{в.ср}}$	$\frac{S_T}{P}$
0	1,0	0,9	1,0	1,11	0	0,318	1,57	1,23
30	0,93	0,84	0,985	1,17	0,5	0,297	1,65	1,39
60	0,75	0,676	0,9	1,33	0,865	0,239	1,87	1,97
90	0,5	0,45	0,707	1,57	1,0	0,159	2,22	3,49
120	0,25	0,226	0,445	1,97	1,0	0,082	2,78	8,82
150	0,067	0,06	0,17	2,82	1,0	0,0215	3,96	47

Процессы в идеальном ТТ. Форма напряжения на активной нагрузке при питании синусоидальным током для схемы рис. 3.1, б представлена на рис. 3.3, а. Заштрихованная часть напряжения  $u_2$  приложена к нагрузке, незаштрихованная — к запертым тиристорам. Среднее (за полу-период) и действующее значения напряжения на нагрузке определяются соотношениями [15]:

$$U_{н.ср} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} (1 + \cos \varphi) = U_{2ср} \frac{(1 + \cos \varphi)}{2};$$

$$U_{н.д} = U_2 \sqrt{\frac{\pi - \varphi + \sin 2\varphi/2}{\pi}}.$$

Коэффициент формы

$$k_\phi = \frac{U_{н.д}}{U_{н.ср}} = \frac{1}{1 + \cos \varphi} \sqrt{\frac{\pi}{2} \left( \pi - \varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right)}.$$

Активная мощность, выделяемая в нагрузке,

$$P = I_{2ср} U_{н.ср}.$$

Расчетная мощность трансформатора (для данного угла регулирования  $\varphi$ )

$$S_T = U_2 I_{2\varphi},$$

где  $I_{2\varphi} = U_{н.д} / R_n$ .

Основные расчетные соотношения, характеризующие работу схемы при фазовом регулировании, приведены в табл. 3.1. Величины  $U_{вмпр}$ ,  $U_{вмобр}$  характеризуют амплитудные значения напряжения на вентиле в прямом и обратном направлении,  $I_{в.ср}$ ,  $I_{в.д}$  и  $I_{вт}$  — среднее, действующее и амплитудное значения тока через вентиль.

На рис. 3.3, б представлена внешняя характеристика рассматриваемого идеального ТТ в относительных единицах в режиме стабилиза-

тора среднего значения тока нагрузки. На рис. 3.3, б  $\epsilon_{ср} = U_{н.ср} / U_{2ср}$ ;  $\gamma_{ср} = I_{2ср} / I_{2ср0}$ , где  $I_{2ср0} = U_{2ср} / R_n$ . Напомним, что такую характеристику обеспечивает идеальный дроссель насыщения, являющийся параметрическим стабилизатором среднего тока. Очевидно, что при рабочих сварочных режимах, когда  $\epsilon_{ср} = 0,4 \dots 0,5$ , устройство будет работать при больших углах регулирования. При этом ток нагрузки имеет прерывистый характер с большими бестоковыми паузами; тиристоры и трансформатор работают в неблагоприятных энергетических режимах. Поэтому такие простейшие идеальные трансформаторы в чистом виде в дуговой сварке применения не нашли.

Работа реальных ТТ. В последние годы разработан ряд специальных схем и конструкций ТТ, простых и экономичных, обеспечивающих достаточно высокую стабильность горения дуги и позволяющих реализовать все преимущества тиристорного регулирования [3, 14]. Отличительной особенностью этих устройств является наличие силового трансформатора с развитым электромагнитным рассеянием или дополнительного дросселя в сварочной цепи.

Силовые схемы ТТ могут быть подразделены по двум основным признакам: способу обеспечения непрерывности процесса сварки и месту установки тиристорного фазорегулятора — в первичной или вторичной цепи.

По первому признаку ТТ делятся на две группы. В трансформаторах одной группы сварочный ток  $i_2$  (рис. 3.4, а) прерывистый. Длительность протекания тока  $\theta$  определяется углом включения силовых тиристоров  $\varphi$ , который здесь является также углом сдвига между током  $i_2$  и напряжением холостого хода трансформатора  $u_{20}$ . Для надежного повторного возбуждения применена импульсная стабилизация горения дуги. В момент  $\varphi$  окончания бестоковой паузы на дугу накладывается стабилизирующий импульс тока. Тиристорный фазорегулятор совмещает функции управления значением тока и коммутирующего элемента импульсного стабилизатора горения дуги.

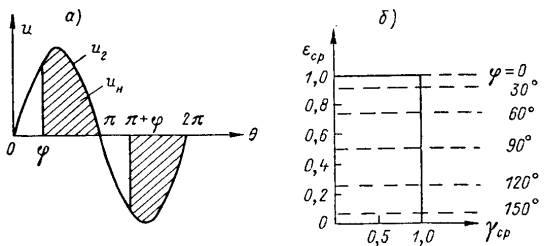


Рис. 3.3. Диаграмма напряжений (а) и внешняя характеристика трансформатора в режиме стабилизации тока (б)

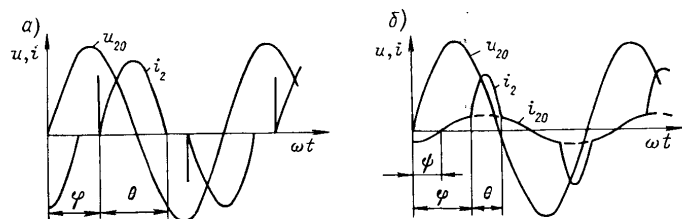


Рис. 3.4. Диаграммы напряжений и токов трансформатора с импульсной стабилизацией (а) и цепью подпитки (б)

В трансформаторах другой группы стабильность процесса сварки обеспечена непрерывностью сварочного тока (рис. 3.4, б). Для заполнения бестоковых пауз в интервалы непроводимости тиристоров использована специальная цепь, называемая цепью подпитки дуги, по которой проходит минимально необходимый для устойчивого процесса сварки ток (ток подпитки  $i_{20}$ ). Сдвиг между током  $i_{20}$  и напряжением  $u_{20}$  здесь определяется углом  $\psi$ , зависящим от соотношения напряжений дуги и цепи подпитки:

$$\cos \psi = \frac{\pi U_D}{2U'_{20m}}$$

где  $U'_{20m}$  — амплитудное значение напряжения цепи подпитки.

В промышленных сварочных установках наибольшее распространение получили ТТ с прерывистым регулированием тока и импульсной стабилизацией, так как применение цепи подпитки связано с дополнительным расходом активных материалов, с применением дополнительного коммутатора цепи подпитки для снятия напряжения холостого хода, а относительно низкая скорость нарастания тока подпитки при смене полярности обуславливает невысокие сварочные качества источников.

Размещение тиристорного фазорегулятора в первичной или вторичной (сварочной) цепи трансформатора во многом определяет конструкцию ТТ. Во всех случаях, когда не требуется управлять значением постоянной составляющей сварочного тока, предпочтительнее включение тиристоров в сравнительно слаботочную цепь первичной обмотки трансформатора. Кроме снижения габаритов регулятора и потерь в тиристорах, такое решение позволяет уменьшить или исключить потери холостого хода трансформатора, обеспечивает оперативные отключения его от питающей сети. Однако при включении тиристоров в первичную цепь трансформатора становится невозможным регулировать (компенсировать) постоянную составляющую сварочного тока; в трансформаторах с цепью подпитки уменьшается диапазон регулирования

сварочного тока, повышаются требования к симметрии импульсов управления тиристорами, к надежности и электрической прочности цепей управления.

**Трансформаторы с цепью подпитки.** По данным многочисленных экспериментов значение тока подпитки, достаточное для стабильного горения дуги, составляет:

10–15 А для аргодуговой сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов при наличии импульсного стабилизатора дуги и напряжения холостого хода источника питания около 70 В;

10–15 А для ручной дуговой сварки обмазанными электродами;

20–30 А для автоматической сварки под флюсом.

Поскольку при смене полярности электродов ток дуги равен току цепи подпитки, очевидно, что параметры последней целиком определяют надежность вторичных возбуждений дуги. Малое значение тока подпитки позволяет использовать для повышения стабильности дуги методы, традиционно считающиеся невыгодными по энергетическим или массо-габаритным характеристикам: увеличение напряжения холостого хода источника, последовательный резонанс напряжений, формирование прямоугольной волны тока подпитки и т. п.

На рис. 3.5, а, б, в представлены упрощенные схемы ТТ с цепью подпитки и тиристорами в цепи вторичной обмотки трансформатора. В схеме рис. 3.5, а тиристоры шунтированы дросселем, реактивное сопротивление которого  $\omega L_2$  на порядок выше сопротивления рассеяния  $\omega L_1$  силового трансформатора ТТ.

Схемы ТТ, приведенные на рис. 3.5, б, в, позволяют повысить напряжение холостого хода источника без заметного увеличения его установленной мощности. В цепь подпитки введена дополнительная обмотка силового трансформатора ТТ. В схеме рис. 3.5, б дополнительная обмотка включена последовательно и согласна с основной вторичной обмоткой ТТ. В схеме рис. 3.5, в дополнительная обмотка и дроссель подпитки включены параллельно нагрузке источника.

Напряжение цепи параллельной подпитки  $U'_{20}$  выше напряжения  $U_{20}$ , что исключает возможность включения тиристоров на холостом ходу; во время сварки основная и подпиточная цепи развязаны дуговым падением напряжения.

Дополнительная обмотка и дроссель в схемах рис. 3.5, б, в могут быть заменены отдельным трансформатором с напряжением холостого хода  $U'_{20}$  и требуемым реактивным сопротивлением или обмоткой силового трансформатора, имеющей слабую магнитную связь с первичной обмоткой трансформатора (например, намотанной на дальнее ярмо).

На рис. 3.5, г, д представлены схемы ТТ с подпиткой и тиристорным фазорегулятором в цепи первичной обмотки силового трансформатора.

Непосредственное шунтирование тиристоров дросселем (или резистором в трансформаторе малой мощности) снижает напряжение на первичной обмотке сварочного трансформатора в интервалы непроводимости тиристоров, что отрицательно влияет на устойчивость горения дуги. Для устранения этого явления может быть использован вспомогательный трансформатор или автотрансформаторная схема с дросселем (рис. 3.5, г, д).

**Трансформаторы с прерывистым питанием дуги.** На рис. 3.5, е, ж, з приведены схемы ТТ, в которых цепь подпитки исключена и ток дуги прерывистый [6]. В ТТ по схеме рис. 3.5, е параллельно первичной обмотке силового трансформатора включена цепь, состоящая из конденсатора и дополнительной импульсной обмотки трансформатора,

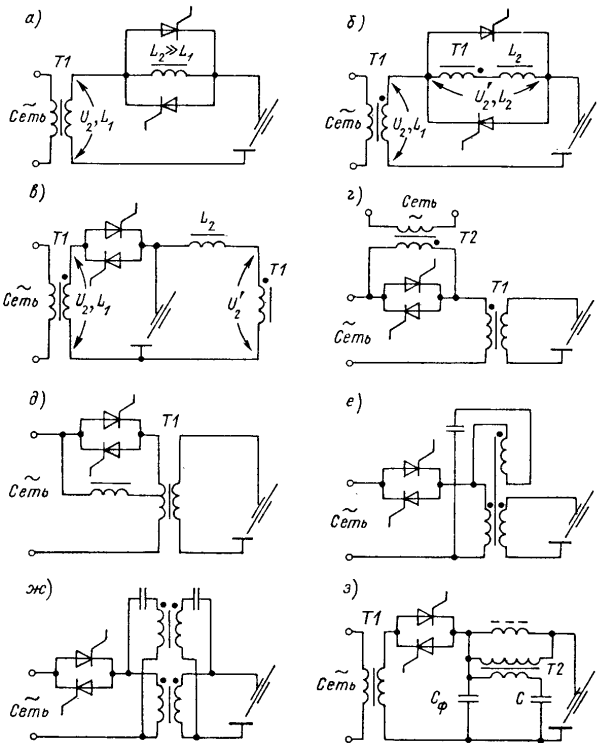


Рис. 3.5. Схемы трансформаторов с цепью подпитки (а-д) и импульсной стабилизацией (е-з)

причем дополнительная обмотка расположена в зоне вторичной обмотки силового трансформатора, например намотана поверх нее с тем, чтобы обеспечить достаточную магнитную связь между этими двумя обмотками. При включении любого из тиристоров конденсатор заряжается до текущего значения сетевого напряжения. Зарядный ток конденсатора проходит по дополнительной обмотке, трансформируется во вторичную цепь силового трансформатора и вызывает в дуговом промежутке импульс напряжения, достаточный для повторного возбуждения дуги. По окончании периода проводимости тиристора дуга гаснет, конденсатор разряжается на первичную обмотку силового трансформатора.

В следующий полупериод сетевого напряжения включается второй тиристор фазорегулятора, конденсатор заряжается в обратном направлении, его зарядный ток вызывает стабилизирующий импульс в межэлектродном промежутке и повторное возбуждение дуги.

Параметры стабилизирующего импульса определяются подбором соотношения витков импульсной и вторичной обмоток и емкостью конденсатора. Амплитуда импульса зависит от угла включения тиристоров, однако незначительно, поскольку в реальных ТТ с кратностью регулирования сварочного тока около двух угол включения тиристоров изменяется в пределах 60–120° эл., что соответствует колебаниям амплитуды импульса приблизительно на 14% от максимального значения. В тех же пределах колеблется относительно максимального значения и скорость нарастания сварочного тока при смене полярности:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{20m} \sin \varphi - U_d}{L_{св}}$$

Министерство  
Энергетики  
и  
Электроэнергетики  
России

где  $U_{20m}$  – амплитуда напряжения холостого хода вторичной обмотки сварочного трансформатора;  $L_{св}$  – индуктивность сварочного контура.

Таким образом, скорость нарастания тока при фазовом регулировании без подпитки в отличие от амплитудного регулирования практически не убывает при снижении значения тока.

В тех случаях, когда выполнение дополнительной импульсной обмотки почему-либо нежелательно, может быть использован отдельный импульсный трансформатор (рис. 3.5, ж), вторичная обмотка которого включена через разделительный конденсатор параллельно вторичной обмотке сварочного трансформатора.

Экспериментально установлено, что оптимальный коэффициент трансформации цепи стабилизирующего импульса равен единице; емкость конденсатора в трансформаторах для автоматической сварки под флюсом на 1000 и 2000 А, выполненных по схеме рис. 3.5, е, составляет 10 мкФ, а в трансформаторах для ручной сварки на 315–500 А может быть снижена до 2 мкФ. В схеме по рис. 3.5, ж для получения тех же параметров импульса емкость конденсатора должна быть удвоена. Длительность стабилизирующего импульса  $\tau$  в зависимости от емкости и режима сварки изменяется в пределах 20–100 мс.

Число витков  $w$  и сечение  $s$  (в метрах квадратных) магнитопровода импульсного трансформатора можно приблизительно определить по формуле

$$ws = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1 \tau}{4 B_m}$$

где  $U_1$  – напряжение сети, В;  $\tau$  – длительность импульса, с;  $B_m = 1,5$  Тл.

Для подавления высокочастотных колебаний в цепь импульсной стабилизации необходимо включить резистор с сопротивлением 1–2 Ом.

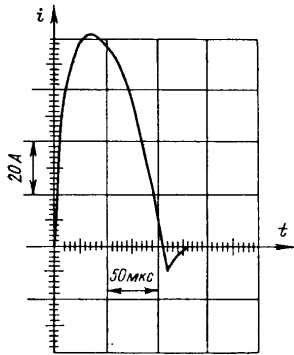


Рис. 3.6. Осциллограмма стабилизирующего импульса трансформатора ТДФЖ-1002

На рис. 3.6 представлена осциллограмма стабилизирующего импульса трансформатора ТДФЖ-1002, выполненного по схеме рис. 3.5, е.

Принцип импульсной стабилизации дуги прерывистого переменного тока может быть реализован и при установке тиристорного фазорегулятора во вторичной цепи сварочного трансформатора. На рис. 3.5, з дана схема ТТ с устройством генерации высоковольтных импульсов,

обеспечивающих первоначальное зажигание и повторное возбуждение дуги. В момент включения тиристора зарядный ток конденсатора  $C$  наводит во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора  $T2$  импульс высокого напряжения, достаточный для пробоя межэлектродного промежутка. Конденсатор фильтра  $C_f$  защищает источник питания от перенапряжений.

На рис. 3.7 приведены внешние характеристики тиристорных трансформаторов с цепью подпитки (а) и без нее (б) для углов включения  $\varphi$  от 0 до 120° эл. Кривая 1 является внешней характеристикой цепи подпитки.

Расчетные соотношения для токов, напряжений и мощности дуги при фазовом регулировании. Приведенные ниже расчетные соотношения позволяют произвести электрические расчеты силового трансформатора, выбор тиристорных фазорегуляторов и оценить технологические возможности ТТ применительно к конкретным видам сварки. Вывод

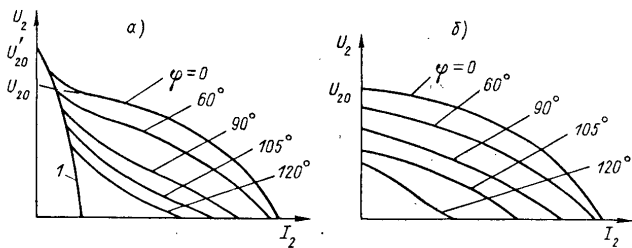


Рис. 3.7. Внешние характеристики трансформаторов с цепью подпитки (а) и импульсной стабилизацией (б)

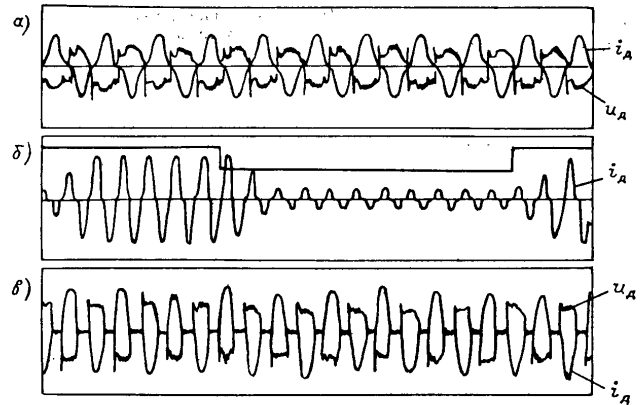


Рис. 3.8. Осциллограммы сварочного тока и напряжения дуги трансформатора с цепью подпитки (а, б) и импульсной стабилизацией (в) в режимах непрерывного (а, в) и импульсного (б) тока, снятые при сварке алюминия вольфрамовым электродом (а, б) и стали под флюсом (в)

расчетных соотношений произведен сначала для режима прерывистых сварочных токов.

Анализ осциллограмм сварочного тока ТТ разной мощности и назначения (рис. 3.8) свидетельствует о практической синусоидальности импульсов сварочного тока. Тогда для среднего за полупериод и действующего значений сварочного тока с учетом его прерывистого характера справедливы соотношения:

$$I_{2cp} = \frac{2\theta}{\pi^2} I_{2m}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{\theta}{2\pi}} I_{2m},$$

где  $I_{2m}$  — амплитудное значение импульса тока.

Коэффициент  $\pi/\theta$  характеризует скважность импульсов сварочного тока. Введя коэффициент  $\alpha = \sqrt{\pi/\theta}$ , получим

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi\alpha^2} I_{2m}; \quad I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}\alpha} I_{2m}; \quad k_{\Phi} = 1,11\alpha,$$

где  $k_{\Phi}$  — коэффициент формы тока.

Для практических расчетов целесообразно представить все расчетные параметры через действующие значения напряжения и тока дуги, выраженные в относительных единицах. За базовые величины приняты действующие значения вторичного напряжения холостого хода трансформатора и вторичного тока при коротком замыкании:

$$U_6 = U_{20}; I_6 = I_{2к.з} = U_{20}/x_2,$$

где  $x_2$  — приведенное ко вторичной цепи индуктивное сопротивление трансформатора.

Относительные значения напряжения и тока дуги:

$$\epsilon_d = \frac{U_d}{U_{20}}; \gamma_d = \frac{I_d}{I_{2к.з}} = \frac{I_d x_2}{U_{20}}.$$

Расчеты, проведенные на ЭВМ, и эксперименты показали, что при поддержании постоянства действующего значения тока  $I_2 = \text{const}$  длительность его протекания, амплитуда и коэффициент формы остаются практически постоянными при изменении напряжения дуги  $U_d$  в широких пределах. На рис. 3.9, а приведены расчетные зависимости, показывающие постоянство угла проводимости  $\theta$  при изменении  $\epsilon_d$  при различных значениях  $\gamma_d$ . Это обстоятельство позволяет построить кривые изменения основных параметров ТТ с прерывистым током ( $\alpha, \theta, \gamma_{cp} = I_{cp}/I_6, \gamma_m = I_{2m}/I_6$ ) в функции  $\gamma_d$  без учета значения напряжения  $\epsilon_d$  (рис. 3.9, б). Пользуясь зависимостью  $\alpha = f(\gamma_d)$ , легко по действующему значению напряжения дуги определить его амплитуду  $E_d = \alpha U_d$ , которая предполагается постоянной в течение всего времени горения дуги.

Ниже даны примеры использования приведенных соотношений.

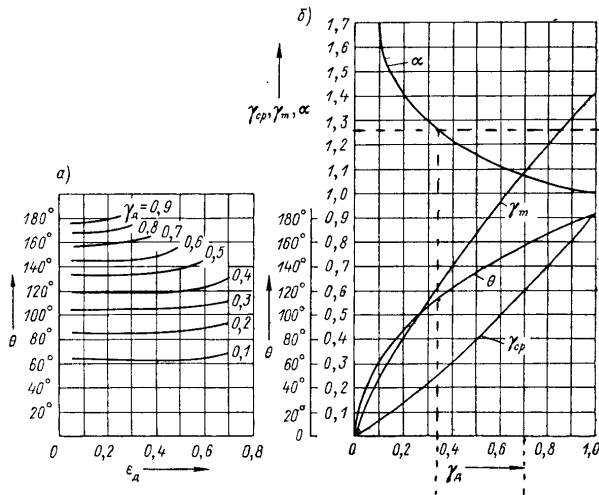


Рис. 3.9. Зависимости  $\theta = f(\epsilon_d)$  при  $\gamma_d = \text{const}$  (а) и  $\theta, \alpha, \gamma_{cp}, \gamma_m = f(\gamma_d)$  (б)

**Пример 3.1.** Тиристорный трансформатор для ручной дуговой сварки на номинальный ток 315 А имеет два диапазона регулирования с токами короткого замыкания  $I_{1к.з} = 480$  А и  $I_{2к.з} = 240$  А. Сварка производится током  $I_d = 120$  А. Определить амплитуду и длительность импульсов тока в случае работы на первом и втором диапазонах тока.

**Решение.** По графику (рис. 3.9, б) находим для  $\gamma_d = 0,25$  значение  $\theta = 95^\circ$  эл.;  $I_{2m} = 0,5 I_{2к.з} = 240$  А. Для второго диапазона:  $\gamma_d = 0,5$ ;  $\theta = 133^\circ$  эл.;  $I_{2m} = 0,85 I_{2к.з} = 204$  А.

**Пример 3.2.** Трансформатор ТДФЖ-2002 использован для автоматической сварки на режиме  $I_d = 675$  А;  $U_d = 32$  В. Оператор ошибочно выбрал диапазон больших токов ( $I_{к.з} = 4500$  А). Определить амплитуду дугового напряжения  $E_d$ .

**Решение.** По графику (рис. 3.9, б) для  $\gamma_d = 675/4500 = 0,15$  находим  $\alpha = 1,54$ , тогда  $E_d = 49$  В. При использовании диапазона малых токов с  $I_{к.з} = 1800$  А дуга будет значительно короче:  $E_d = 40$  В.

В ТТ с цепью подпитки ток дуги практически синусоидален при полностью открытых и закрытых тиристорах. В промежуточных режимах  $k_\Phi$  зависит как от относительной продолжительности включения тиристоров  $\theta/\pi$ , так и от соотношения токов короткого замыкания вспомогательной и основной цепей  $n = I'_{к.з}/I_{к.з}$ .

Для определения  $k_\Phi$  для ТТ с цепью подпитки получена эмпирическая формула

$$k_\Phi = 1,11 \frac{n + (\theta/\pi)^2}{n + (\theta/\pi)^{5/2}}.$$

Зависимость коэффициента формы тока дуги с подпиткой от относительной продолжительности включения тиристоров  $k_\Phi = f(\theta/\pi)$  для ряда значений  $n$  приведена на рис. 3.10, а. На рис. 3.10, б изображена экспериментальная зависимость  $k_\Phi = f(\gamma_d)$  тиристорного трансформатора, выполненного по схеме рис. 3.5, в с соотношением токов короткого замыкания основной и подпиточной цепей  $n = 0,037$ .

**Мощность дуги.** Активная мощность дуги переменного тока зависит от амплитуды дугового напряжения и среднего тока:

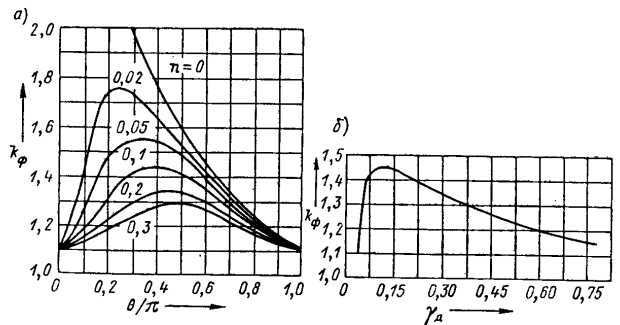


Рис. 3.10. Зависимость  $k_\Phi = f(\theta/\pi)$  для трансформатора с цепью подпитки (а) и экспериментальная зависимость  $k_\Phi = f(\gamma_d)$  (б)

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_d(t) u_d(t) dt = E_d \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_d(t) dt = E_d I_{cp}$$

При поддержании постоянства длины дуги ( $E_d = \text{const}$ ) и действующего значения тока мощность дуги с ростом коэффициента формы тока падает:  $P = E_d I_d / k_\phi$ .

При поддержании постоянства действующих значений дугового напряжения и тока мощность дуги не зависит от коэффициента формы тока:  $P = \alpha U_d I_d / k_\phi = 0,9 U_d I_d$ , поскольку снижение среднего значения тока компенсируется ростом амплитуды дугового напряжения.

Для дуги с подпиткой (особенно при сварке неплавящимся электродом) действующее значение напряжения дуги практически не зависит от коэффициента формы тока:  $U_d \approx E_d$ , соответственно  $P = U_d I_d / k_\phi$ .

Коэффициент мощности тиристорного трансформатора убывает пропорционально росту коэффициента формы тока в тех случаях, когда поддерживается постоянство длины дуги:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_{20} I_d} = \frac{E}{U_{20} k_\phi}$$

(без учета активных потерь в источнике питания).

При поддержании постоянства действующего значения напряжения дуги, например при автоматической сварке под флюсом, коэффициент мощности трансформатора при фазовом и амплитудном регулировании тока выражается одинаково:

$$\cos \varphi = 0,9 \frac{U_d}{U_{20}}$$

**Технологические особенности ТТ.** Технологические особенности ТТ изучены недостаточно. Есть сведения [30], что повышение плотности тока в электроде при сварке от ТТ и более резкое нарастание тока способствуют мелкокапельному переносу металла, при этом уменьшаются выгорание примесей и перегрев изделия.

Исследование микроструктуры и механических свойств швов показали, что при сварке знакопеременными импульсами в 1,5–2 раза сокращается зона термического влияния, уменьшается зернистость, повышается прочность и пластичность шва.

Однако рост коэффициента формы сварочного тока при увеличении глубины регулирования неблагоприятно отражается на стойкости обмазки штучного электрода и износостойкости вольфрамового электрода: дуга равной мощности при повышенном  $k_\phi$  требует большего диаметра электрода.

При автоматической сварке под флюсом на стандартных режимах из-за повышенной длины дуги появляется тенденция к парообразованию в швах, что вынуждает выполнять трансформаторы с разбивкой полного диапазона регулирования тока на ступени, рекомендовать сварку на пониженных на 10–15% значениях действующего напряжения дуги. Установлено, что сварка плавящимся электродом дает удовлетворительные результаты при коэффициенте формы тока, не превышающем 1,4.

В ТТ с прерывистым регулированием для того, чтобы выполнялось условие  $k_\phi \leq 1,4$ , диапазон плавного регулирования не должен быть более 2. Если учесть, что максимальный ток дуги примерно равен  $0,7 I_{к.з}$  ( $\gamma_{д \max} = 0,7$ ), пределы регулирования тока дуги составляют  $\gamma_{д} = 0,35 \dots 0,7$ . В ТТ с цепью подпитки диапазон плавного регулирования значительно шире. Так, цепь подпитки с  $n = 0,1$  позволяет плавно регулировать ток  $\gamma_{д} = 0,1 \dots 0,7$  с коэффициентом формы не выше 1,45 (рис. 3.10, а).

**Силовой трансформатор.** Существенное достоинство ТТ – простота и надежность силового трансформатора. Отсутствие подвижных частей и стальных шунтов, требующих высокого качества сборки и подверженных вибрации, позволило сделать этот важнейший узел источника питания простым в изготовлении и долговечным в эксплуатации.

В ТТ получила распространение традиционная двухстержневая конструкция трансформатора с фиксированным повышенным магнитным рассеянием (рис. 3.11). Первичная 1 и вторичная 2 обмотки состоят из двух катушек. На каждом стержне катушки и изоляционные колодки образуют слоеный набор, зажатый между нижними швеллерами и шпильками с опорой в верхних швеллерах. Расстояние между первичной и вторичной обмотками составляет 2–4 см.

Индуктивное сопротивление  $x$  такого трансформатора может быть рассчитано по приведенным ранее формулам. Для приближенных расчетов может быть рекомендована эмпирическая формула

$$x = 1,8 \cdot 10^{-6} w_2^2 h_{ок} (1 + 1,45 \frac{b}{c_{ок}}),$$

где  $h_{ок}$ ,  $c_{ок}$  – высота и ширина окна, см;  $b$  – толщина набора, см.

Для создания диапазона малых токов применена реакторная дисковая обмотка 3, установленная в окне трансформатора в плоскости, параллельной его стержням. Реакторная обмотка включается последовательно и согласно с первичной обмоткой или последовательно и встречно со вторичной обмоткой трансформатора. Обратное включение реакторной обмотки, например согласно со вторичной обмоткой трансформатора, вызывает увеличение тока короткого замыкания.

Если высота реакторной обмотки в окне трансформатора незначительно отличается от суммарной высоты силовых катушек, то число ее витков для рассматриваемой конструкции может быть определено по формуле

$$I'_{2к.з} = I_{2к.з} / (0,5n^2 + 0,75n + 1),$$

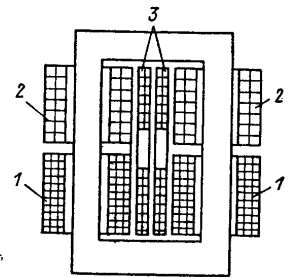


Рис. 3.11. Силовой трансформатор с реакторной обмоткой

где  $I'_{2к.з}$ ,  $I_{2к.з}$  — токи короткого замыкания трансформатора с реакторной обмоткой и без нее;  $n$  — отношение чисел витков реакторной и первичной или вторичной силовой обмотки.

#### 3.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРОВ В ФАЗОРЕГУЛЯТОРЕ

Основным условием многолетней безаварийной работы ТТ является правильный выбор силовых тиристоров. При этом должны быть учтены тепловые нагрузки тиристоров в номинальном и максимальном режимах работы, технологические и аварийные перегрузки, циклические нагрузки, скорости нарастания напряжения и тока, особенности управления тиристорами. Во всех режимах работы тиристорного фазорегулятора, кроме аварийного, температура структуры тиристора не должна превышать максимального значения  $T_{max} = 125^\circ\text{C}$ . Величину  $T$  определяют по формуле  $T = PR_T + T_0$ , где  $P$  — мощность потерь в тиристоре, Вт;  $R_T$  — тепловое сопротивление,  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $T_0$  — температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

Величина  $R_T$  зависит от конструкции тиристора и охладителя (радиатора), от способа и интенсивности охлаждения и от времени, прошедшего с момента начала нагрева структуры. Тепловое сопротивление уменьшается при увеличении скорости обдува охладителя или увеличении расхода воды в тиристорах с водяным охлаждением; минимальное в начале нагрева, тепловое сопротивление становится максимальным (установившимся)  $R_T = R_{уст}$ , когда температура охладителя установится на определенном уровне нагрева. Графики зависимости величины  $R_T$  от условий охлаждения и времени нагрева приводятся для типовых конструкций охладителей в справочной литературе и каталогах тиристоров.

Мощность потерь в одном тиристоре фазорегулятора можно определить из соотношения

$$P = 0,5 (U_0 I_{cp} + R_d I_d^2),$$

где  $U_0$ ,  $R_d$  — пороговое напряжение и динамическое сопротивление тиристора, значения которых приведены в каталоге;  $I_d$  — заданный действующий ток фазорегулятора;  $I_{cp}$  — суммарный средний ток.

Для расчета нагрева тиристоров трансформатора, работающего с ПВ = 100%, пользуются установившимся значением теплового сопротивления.

При циклической нагрузке определяют максимальную и минимальную температуру структуры:

$$T' = PR'_{т.ц} + T_0; \quad T'' = PR''_{т.ц} + T_0,$$

где  $R'_{т.ц}$ ,  $R''_{т.ц}$  — тепловые сопротивления в момент окончания импульса нагрузки и в момент окончания паузы.

Для ТТ с принудительным воздушным охлаждением тиристоров при скорости охлаждающего воздуха не менее 6 м/с, работающих с ПВ =

= 60% при 10-минутном цикле, можно считать  $R'_{т.ц} = R_{уст}$  и  $R''_{т.ц} = 0$ , т. е. за 6 мин нагрузки тиристор нагревается до установившейся температуры, а за 4 мин паузы остывает до температуры окружающего воздуха.

Для ТТ с естественным воздушным охлаждением тепловое сопротивление в режиме циклической нагрузки можно определить по формулам:

$$R'_{т.ц} = kR_{уст} + (1 - k)R_{ц+и} - R_{ц} + R_{и};$$

$$R''_{т.ц} = kR_{уст} + (1 - k)R_{ц} - R_{и},$$

где  $k = \text{ПВ}\%/100$ ;  $R_{ц}$  — величина  $R_T$ , соответствующая длительности цикла сварки  $t_{ц}$ ;  $R_{и}$  — величина  $R_T$ , соответствующая длительности импульса нагрузки  $t_{и}$ ;  $R_{ц+и}$  — величина  $R_T$ , соответствующая суммарному времени импульса нагрузки и цикла  $t_{ц+и}$ . Так, для ПВ = 60% будет  $k = 0,6$ ;  $t_{ц} = 600$  с (при обычно принятом 10-минутном цикле);  $t_{и} = 360$  с;  $t_{ц+и} = 960$  с.

Изменение температуры при циклической нагрузке  $\Delta T = T' - T'' = P(R'_{т.ц} - R''_{т.ц})$  определяет допустимое число циклов  $n$ , следовательно, срок службы тиристора.

В процессе сварки тиристоры испытывают кратковременные технологические перегрузки. Например, короткое замыкание сварочной цепи в момент возбуждения дуги увеличивает ток фазорегулятора в 1,3–2 раза по сравнению с номинальным. Температура тиристора в момент окончания технологической перегрузки

$$T_{т.п} = T_0 + P(R_{уст} - R_{т.п}) + P_{к.з}R_{т.п},$$

где  $P$  — мощность потерь в режиме, предшествовавшем перегрузке;  $P_{к.з}$  — мощность потерь в режиме короткого замыкания нагрузки;  $R_{т.п}$  — тепловое сопротивление, соответствующее длительности технологической перегрузки.

Наибольшему нагреву структура тиристоров подвергается в аварийном режиме. Для ТТ с фазорегулятором в цепи первичной обмотки силового трансформатора аварийный режим наступает при потере управления одним из тиристоров. При этом происходит насыщение магнитопровода трансформатора постоянным током тиристора, сохранившего управление, и резкое нарастание этого тока. На рис. 3.12 приведена осциллограмма тока тиристора в аварийном режиме для трансформатора ТДФЖ-2002 — от момента отключения цепи управления вторым тиристором фазорегулятора до срабатывания электромагнитного расцепления защитного автоматического выключателя. Уставка по току срабатывания автоматического выключателя равна 4000 А.

Аварийный режим может возникнуть и во время переходных процессов в трансформаторе, например при возбуждении дуги, если длительность импульсов управления тиристорами недостаточна: при длительности интервала проводимости одного тиристора  $\theta > \pi$  второй тиристор не может включиться до окончания полуволны тока первого (полуволновой эффект). Расчет температуры тиристора в ава-

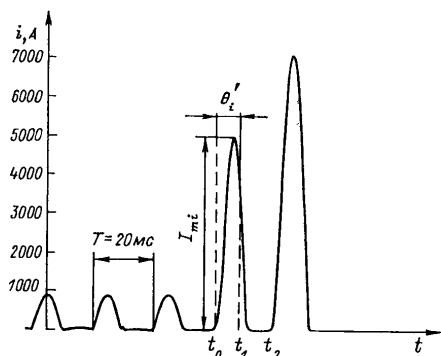


Рис. 3.12. Осциллограмма тока тиристора в аварийном режиме (трансформатор ТДФЖ-2002)

рийном режиме требует наличия осциллограмм аварийного тока и может быть выполнен по следующей методике:

последовательно с одним из тиристоров включают шунт, сигнал с которого подают на шлейф осциллографа;

включают трансформатор на заданный режим работы;

спустя 0,1–0,5 с после начала записи тока тиристора снимают сигнал управления со второго тиристора. Запись продолжают до момента срабатывания автоматического выключателя в первичной цепи ТТ;

по осциллограмме определяют амплитуду  $I_{mi}$  и длительность  $\theta$  импульсов аварийного тока;

пользуясь известными формулами, находят среднее и действующее значения тока каждого импульса:

$$I_{срi} = \frac{I_{mi}}{1,57} \frac{\theta}{T}; \quad I_{ди} = \frac{I_{mi}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\theta}{T}},$$



где  $T = 20$  мс – период следования импульсов.

Затем определяют среднюю и максимальную мощность каждого импульса:

$$P_{срi} = U_o I_{срi} + R_{дi} I_{ди}^2; \quad P_{maxi} = U_o I_{mi} + R_{дi} I_{mi}^2.$$

Для расчета максимальной температуры структуры тиристора реальный импульс тока заменяют прямоугольным импульсом (рис. 3.12). Этот эквивалентный импульс имеет такое же значение максимальной и средней мощности, как и реальный импульс, и длительность  $\theta_i'$ , равную  $TP_{срi}/P_{maxi}$ , чтобы сохранить прежнее соотношение между максимальной и средней мощностью. Такой способ пересчета в прямоугольные импульсы, как известно, соответствует худшему случаю приближения, так как прямоугольный импульс вызывает большее повышение температуры, чем импульс любой другой формы с такими же максимальным и средним значениями мощности. Таким образом, в расчет вносят определенный запас.

Дальнейший расчет производят, пользуясь методом наложения, при котором прекращение действия импульса с определенной мощностью представляется в виде появления импульса с таким же значением мощности, но со знаком минус [31]. Так, если действие прямоугольного импульса с мощностью  $P$  начинается в момент времени  $t_0$ , а заканчивается в момент времени  $t_1$ , то температура структуры тиристора в момент  $t_2$  будет равна

$$T_2 = PR_{(0,2)} - PR_{(1,2)}.$$

Здесь  $R_{(0,2)}$  и  $R_{(1,2)}$  – тепловые сопротивления, соответствующие интервалам времени  $(t_2 - t_0)$  и  $(t_2 - t_1)$ .

Аварии предшествовал режим сварки на номинальном токе при мощности потерь  $P_0$  и установившейся температуре структуры тиристора  $\Delta T_0 = P_0 R_{уст}$ . Превышение температуры в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ :

$$\Delta T_1 = P_0 (R_{уст} - R_{(0,1)}) + P_1 R_{(0,1)};$$

$$\Delta T_2 = P_0 (R_{уст} - R_{(0,2)}) + P_1 (R_{(0,2)} - R_{(1,2)}).$$

В этих выражениях  $P_1$  – максимальная мощность первого импульса аварийного тока, а интервал времени в миллисекундах  $(t_1 - t_0) = \theta_1' = 20P_{1ср}/P_{1max}$ .

Если температура структуры перед началом последнего импульса перегрузки  $T_2 = T_0 + \Delta T_2$  не превышает 125 °С, то, пользуясь данными каталога, приведенными для этой температуры, убеждаемся, что амплитуда последнего импульса перегрузки не превышает допустимого значения ударного тока тиристора.

Наряду с нагревом структуры тиристора надежность работы фазорегулятора зависит от скорости нарастания прямого напряжения тиристора  $du/dt$  и прямого тока  $di/dt$ . Наибольшее значение  $du/dt$  на тиристоре возникает в момент восстановления анодного напряжения после прохождения очередной полуволны тока во втором тиристоре. Скорость восстановления анодного напряжения при коротком замыкании цепи нагрузки и  $\varphi = \pi/2$  достигает 20–40 В/мкс и может вызвать самопроизвольное включение тиристора. Включение одного из тиристорov сразу после окончания проводимости второго эквивалентно замене тиристора неуправляемым диодом. В первичной цепи сварочного трансформатора появляется постоянная составляющая тока, нарастание тока сопровождается сильной вибрацией и повышенным "гудением" трансформатора.

Величина  $du/dt$  может быть снижена включением конденсатора параллельно первичной обмотке силового трансформатора. При включенном тиристоре конденсатор заряжен до сетевого напряжения, а с момента выключения тиристора разряжается на первичную обмотку трансформатора со скоростью, определяющей величину  $du/dt$  на втором тиристоре регулятора. В ТТ с прерывистым регулированием тока  $du/dt$  определяется емкостью конденсатора в цепи импульсной стабилизации и сопротивлением цепи его разряда. Так, в трансформаторе ТДФЖ-1002 при емкости конденсатора в цепи импульсной стабилизации  $C = 10$  мкФ величина  $du/dt$  снижается до 3 В/мкс.

Необходимость учета  $di/dt$  объясняется тем, что процесс оптирания тиристора развивается сначала лишь в окрестности управляющего элек-



трода. При больших значениях  $di/dt$  в этой зоне происходит местный перегрев и пробой структуры. Допустимые значения  $di/dt$  приведены в информационных материалах на тиристоры; например, для таблеточного тиристора Т2-320  $(di/dt)_{\max} = 40 \text{ А/мкс}$ . В ТТ величина  $di/dt$  наиболее велика в режиме короткого замыкания сварочной цепи при угле включения  $\varphi = \pi/2$ :

$$(di/dt)_{\max} = \sqrt{2} \omega I_{\text{к.з}} = 4,44 I_{\text{к.з}} \cdot 10^{-4} \text{ А/мкс},$$

где  $I_{\text{к.з}}$  — действующее значение тока фазорегулятора в режиме короткого замыкания.

В аварийном режиме амплитуды импульсов тока тиристора и соответственно  $di/dt$  в 5–10 раз выше, чем в номинальном режиме. В ТТ с цепью импульсной стабилизации величина  $di/dt$  определяется крутизной фронта стабилизирующего импульса, которая приблизительно на порядок выше крутизны фронта рабочего тока трансформатора. В ТДФЖ-1002 составляющая  $di/dt$  от стабилизирующего импульса равна 4,1 А/мкс, в то время как нарастание полуволны первичного тока трансформатора дает значение  $di/dt = 0,27 \text{ А/мкс}$ .

### 3.5. СИСТЕМЫ ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИРИСТОРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Система импульсно-фазового управления (СФУ) тиристорных трансформаторов.** СФУ содержит фазосдвигающее (ФУ) и выходное (ВУ) устройства. Фазосдвигающее устройство осуществляет привязку СФУ к сети переменного тока, от которой питается ТТ, и обеспечивает формирование управляющих импульсов и плавное изменение их фазы относительно напряжения сети. Для управления двумя противофазными тиристорами обычно используется одно ФУ. Импульсы с ФУ на силовые тиристоры поступают не непосредственно, а через выходное усилительное устройство, которое окончательно формирует импульсы с параметрами, обеспечивающими гарантированное включение любого тиристора данного типа в выбранной силовой схеме ТТ и в заданном диапазоне температур. При этом мощность потерь в цепи управления тиристора не должна превышать допустимого значения.

В целом СФУ должна быть помехоустойчивой, надежной, обладать высоким быстродействием, обеспечивать требуемый диапазон изменения фазы импульсов, их симметрию в оба полупериода, необходимые их параметры — амплитуду и длительность.

Примеры реализации элементов СФУ, нашедших широкое применение в отечественных ТТ, показаны на рис. 3.13. Специализированная СФУ отечественных источников с прямоугольной формой тока на магнитных элементах будет рассмотрена в главе пятой.

**Фазосдвигающее устройство.** Принцип действия ФУ (рис. 3.13) основан на заряде конденсатора  $C3$  до определенного уровня с после-

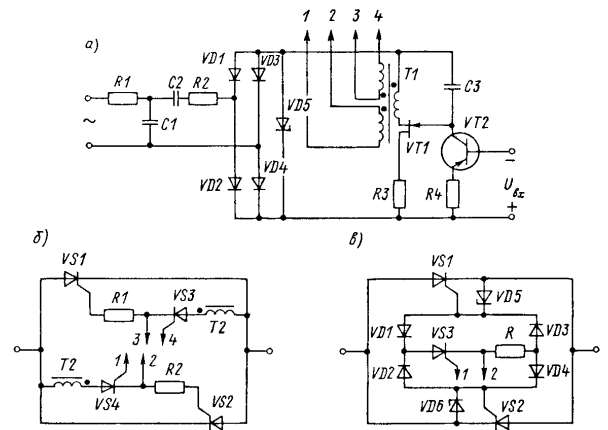


Рис. 3.13. Система импульсно-фазового управления ТТ: а — фазосдвигающее устройство; б, в — выходные устройства

дующим его разрядом на первичную обмотку импульсного трансформатора  $T1$ . Зарядная цепь питается трапециoidalным выпрямленным напряжением, снимаемым со стабилитрона  $VD5$ , включенного на выходе выпрямительного моста  $VD1-VD4$ . На входе выпрямительного моста установлен полосовой фильтр ( $C1, C2, R1, R2$ ), способствующий уменьшению влияния на ФУ искажений напряжения питающей сети.

Конденсатор  $C3$  заряжается коллекторным током транзистора  $VT2$ , включенного по схеме стабилизатора тока. Ток коллектора  $i_{\text{к}}$  и напряжение  $U_{C3}$  на конденсаторе  $C3$  равны:

$$i_{\text{к}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_4}; \quad U_{C3} = \frac{1}{C_3} \int i_{\text{к}} dt = \frac{U_{\text{вх}}}{R_4 C_3} t,$$

где  $U_{\text{вх}}$  — сигнал управления на входе ФУ.

Заряд конденсатора  $C3$  происходит до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет значения  $U_{C3} = k_{\text{п}} U_1$ , где  $U_1$  — напряжение питания схемы, равное напряжению стабилизации стабилитрона  $VD5$ ;  $k_{\text{п}} = 0,65 \dots 0,9$  — коэффициент переключения однопереходного транзистора  $VT1$ . После этого однопереходный транзистор  $VT1$  открывается и конденсатор  $C3$  разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора  $T1$ . Образующиеся импульсы длительностью около 10 мкс поступают через вторичные обмотки трансформатора  $T1$  на выходное устройство (зажимы 1–4).

Зависимость угла включения  $\varphi$  (в радианах) от  $U_{вх}$

$$\varphi = \omega t = 2\pi f R_4 C_3 k_D U_1 / U_{вх}$$

является характеристикой управления ФУ. Линейная зависимость этой характеристики от параметров схемы позволяет компенсировать влияние разброса параметров подстройкой резистора  $R_4$ .

После разряда конденсатора  $C_3$  происходит восстановление запирающей способности транзистора  $VT1$  и повторный заряд конденсатора  $C_3$ . Этот процесс образования пилообразного напряжения заканчивается в конце полупериода питающего напряжения при спаде трапециoidalного напряжения стабилитрона  $VD5$  до нуля и возобновляется в начале следующего полупериода. При нулевом значении питающего напряжения конденсатор  $C_3$  полностью разряжается. Это обеспечивает синхронизацию работы ФУ с напряжением питающей сети и независимость момента начала его работы в каждый последующий полупериод от окончания ее в предыдущем полупериоде.

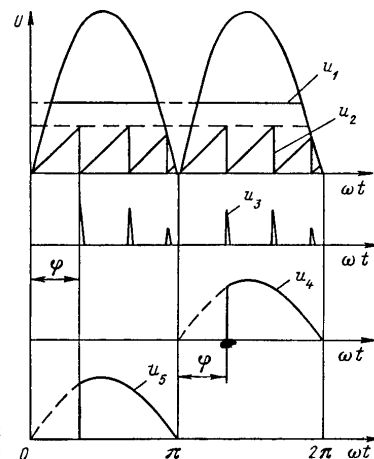
**Выходное устройство.** Для формирования и усиления импульсов управления силовыми тиристорами может быть использовано напряжение вспомогательного трансформатора [10] или анодное напряжение самих тиристоров.

Маломощный тиристор  $VS3$  ( $VS4$ ) (рис. 3.13, б) является коммутатором в цепи, состоящей из обмотки вспомогательного трансформатора  $T2$ , токоограничивающего резистора  $R1$  ( $R2$ ) и управляющего перехода силового тиристора  $VS1$  ( $VS2$ ). Тиристоры  $VS3$  и  $VS4$  включены в противофазные цепи, и поэтому, несмотря на то, что импульсы на их включение с ФУ поступают в оба полупериода, каждый из них открывается только в полупериод, когда анодное напряжение на нем положительно.

Схема ВУ с включением силовых тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  от своего анодного напряжения приведена на рис. 3.13, в. Маломощный тиристор  $VS3$  включен последовательно с токоограничивающим резистором в диагональ моста на диодах  $VD1-VD4$ . На управляющий электрод тиристора  $VS3$  поступают импульсы с зажимов 1 и 2 ФУ. Силовой тиристор, например  $VS1$ , включается от своего анодного напряжения по цепи: стабилитрон  $VD6$ , диод  $VD2$ , тиристор  $VS3$ , резистор  $R$ , диод  $VD3$ . Включение силового тиристора  $VS1$  ( $VS2$ ) происходит при наличии на нем положительного анодного напряжения в момент включения тиристора  $VS3$  от импульса с ФУ. Включаясь, силовой тиристор  $VS1$  ( $VS2$ ) шунтирует мост  $VD1-VD4$ , и ток управления прекращается. Стабилитроны  $VD5$  и  $VD6$  ограничивают напряжения на управляющих электродах силовых тиристоров.

Работа СФУ с ВУ по схеме рис. 3.13, б иллюстрируется диаграммой напряжений, приведенной на рис. 3.14. Трапециoidalное напряжение питания канала  $u_1$  формируется из синусоидального выпрямленного напряжения. Пилообразное напряжение  $u_2$  характеризует заряд конденсатора  $C_3$ . Образованные при разряде конденсатора импульсы напряжения  $u_3$  на вторичных обмотках трансформатора ФУ управляют

Рис. 3.14. Диаграмма напряжений на элементах СФУ



моментами срабатывания (угол  $\varphi$ ) маломощных тиристоров  $VS3$  и  $VS4$ . Импульсы напряжения  $u_4$  и  $u_5$ , управляющие противофазными силовыми тиристорами  $VS1$  и  $VS2$ , поступают с обмоток вспомогательного трансформатора  $T2$  через тиристоры  $VS3$  и  $VS4$ .

Длительность импульсов управления в этой схеме равна  $\pi - \varphi$ . При использовании выходного устройства с питанием анодным напряжением (рис. 3.13, в) длительность импульсов определяется временем включения силовых тиристоров. Однако обе схемы исключают

возникновение рассмотренного ранее "полувольтного эффекта": одна — из-за большой длительности импульсов, другая — за счет наличия на выходе СФУ последовательности управляющих импульсов.

ВУ по схеме рис. 3.13, б следует признать более помехоустойчивым и надежным вследствие того, что вспомогательные тиристоры  $VS3$  и  $VS4$  здесь работают при низких напряжениях. Однако вторая схема, требующая наличия вспомогательных стабилитронов и диодов ( $VD1-VD6$ ), позволяет снизить потери в цепи управления силовых тиристоров. В настоящее время обе схемы находят применение в промышленных ТТ.

**Элементы расчета СФУ тиристорных трансформаторов.** При расчете СФУ особый интерес представляет подход к выбору диапазона регулирования фазы импульсов и параметров управляющих импульсов с учетом потерь в цепи управления тиристора.

Диапазон регулирования фазы импульсов непосредственно связан с техническими параметрами ТТ. Минимальный угол включения  $\varphi_{\min}$  должен соответствовать работе ТТ при максимальных сварочном токе  $I_{22}$  и рабочем напряжении  $U_{22}$  и пониженном на 15% напряжении сети. ТТ при этом должен работать в полнофазном режиме, а угол  $\varphi_{\min}$  должен быть равен углу сдвига между напряжением и током, который можно определить по известному соотношению

$$\varphi_{\min} = \arccos \frac{\pi U_{22}}{2\sqrt{2} \cdot 0,85 U_{20}}$$

Максимальный угол включения  $\varphi_{\max}$  должен соответствовать работе ТТ при коротком замыкании сварочной цепи в режиме минимальных

тока  $I_{21}$  и напряжения  $U_{21}$  и при повышенном на 10% напряжении сети. В режиме короткого замыкания импульс тока нагрузки практически симметричен относительно нуля сетевого напряжения. Зная относительное значение тока короткого замыкания и определив по кривой рис. 3.9, б величину  $\theta_{\min}$  можно вычислить

$$\varphi_{\max} = \pi - \theta_{\min} / 2.$$

Подход к расчету параметров управляющих импульсов покажем на примере трансформатора ТДФЖ-1002 с тиристорами Т2-320 и выходным устройством по схеме 3.13, б. Напряжение вторичных обмоток вспомогательного трансформатора 14 В, сопротивление балластного резистора  $R_6 = 10$  Ом. Диапазон изменения фазы импульсов  $60^\circ$  эл.  $\leq \varphi \leq 120^\circ$  эл. Характеристика управления тиристора Т2-320 приведена на рис. 3.15, а. В каталогах на тиристоры значения допустимой мощности потерь в цепи управления тиристором  $P_{\text{доп}}$  приведены для прямоугольных импульсов при заданной скважности  $Q$ . Поэтому синусоидальный сигнал управления необходимо заменить эквивалентным прямоугольным сигналом той же мощности и длительности  $t_n = \pi - \varphi$  (рис. 3.15, б).

Амплитуда эквивалентного импульса [12]

$$U'_m = U_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{Q}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{Q}},$$

где  $Q = 2\pi / (\pi - \varphi)$  — скважность импульса управления. В нашем случае  $Q = 3$ ;  $U'_m = 16$  В.

Построим на рис. 3.15, а зону разброса параметров управления тиристором Т2-320 для температуры  $-10^\circ\text{C}$ . Она ограничена крайними вольт-амперными характеристиками 1 и 2, а также прямыми с координатами  $U_y = 7$  В;  $I_y = 0,5$  А. Эти значения  $U_y$  и  $I_y$  получены интерполяцией данных каталога. Линия нагрузки 3 соответствует амплитуде фронта управляющего импульса  $U_y(\varphi_{\min}) = U_y(\varphi_{\max}) = 0,86 U_m$ , взятой при напряжении питающей сети, пониженном на 15%. Очевидно, что линия нагрузки 3 лежит в зоне гарантированного включения тиристора.

Линия нагрузки 4 соответствует амплитудному напряжению эквивалентного прямоугольного импульса, рассчитанному с учетом повышенного напряжения сети на 5%. Кривая допустимой мощности для  $Q = 3$  (на рисунке обозначена штриховой линией),  $P_{\text{доп}}(Q) = 8,4$  Вт не пересекает линию нагрузки 4, т. е. мощность импульсов управления не превышает допустимого значения.

В тех случаях, когда при заданной длительности импульсов управления трудно не превысить допустимую мощность, может быть использовано выходное устройство по схеме рис. 3.13, в.

**Автоматическое регулирование в тиристорных трансформаторах.** Если угол включения тиристор в СФУ задавать вручную и не изменять в процессе нагрузки, то ТТ будет работать на естественных внешних характеристиках, приведенных на рис. 3.7. В реальных трансформаторах,

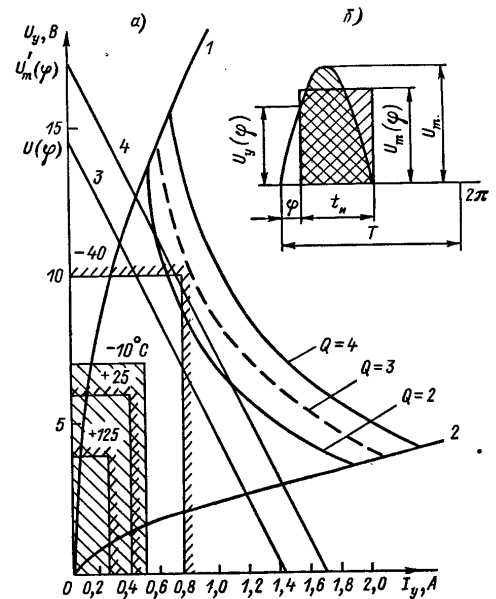


Рис. 3.15. Характеристика управления тиристора Т2-320

предназначенных для определенных видов сварки, прибегают к формированию внешних характеристик с требуемой крутизной. Например, при работе ТТ в составе сварочного автомата или с автоматической головкой для сварки под флюсом с независимой от дугового напряжения скоростью подачи электродной проволоки трансформатор должен иметь жесткую (пологопадающую) внешнюю характеристику. Многочисленными экспериментами установлена оптимальная крутизна характеристики  $(5 \dots 10) \cdot 10^{-3}$  В/А. При более жестких характеристиках увеличивается амплитуда колебаний сварочного тока, вызванных процессами саморегулирования дуги. Увеличение наклона характеристик затрудняет стабилизацию дугового напряжения. В установках, предназначенных для аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом, для стабилизации сварочного тока требуются вертикальные, или "шпиковые", внешние характеристики с крутизной 2–5 В/А. В трансформаторах для ручной дуговой сварки штучными электродами наклон внешних характеристик должен составлять 0,15–0,30 В/А.

Для формирования заданных внешних характеристик, а также для стабилизации режима сварки в ТТ применяют системы автоматического регулирования. В этих системах регулирующий орган, тиристорный фазорегулятор, управляет потоком энергии от питающей сети к объекту регулирования — сварочной дуге. В трансформаторах с ЖВХ в качестве регулируемого параметра используется напряжение дуги, а сварочный ток, определяемый скоростью подачи электродной проволоки и некоторыми другими технологическими факторами, является основным возмущающим воздействием системы автоматического регулирования. В трансформаторах с ПВХ в качестве регулируемого параметра принимается сварочный ток, а основное возмущение системы, колебания длины столба дуги, непосредственно связано с дуговым напряжением. К дополнительным возмущениям, воздействующим на систему автоматического регулирования, относятся колебание напряжения питающей сети и изменение параметров самой системы вследствие, например, прогрева ее элементов.

В ТТ используются замкнутые системы автоматического регулирования, т. е. системы, реагирующие на изменение самого регулируемого параметра, и комбинации замкнутых систем с регуляторами косвенного действия, реагирующими на какой-либо параметр, непосредственно связанный с возмущающим воздействием.

Структурная схема ТТ с замкнутой системой автоматического регулирования приведена на рис. 3.16. Силовой трансформатор *СТ* с фазорегулятором *ФР* в первичной (или вторичной) цепи подключены к нагрузке — сварочной дуге *СД*. Фазорегулятор снабжен системой импульсно-фазового управления (СФУ). На вход СФУ с элемента сравнения *ЭС* поступает разность сигналов  $U_d - U_{o.c}$  с блока задания *БЗ* и датчика обратной связи *Д* регулируемой величины. Обычно элементом сравнения является транзистор или операционный усилитель, входящий в состав СФУ. Увеличивая коэффициент усиления системы (отношение напряжения на выходе фазорегулятора *ФР* к напряжению на входе СФУ), можно добиться очень малой ошибки регулирования, т. е. получить практически горизонтальную или вертикальную внешнюю характеристи-

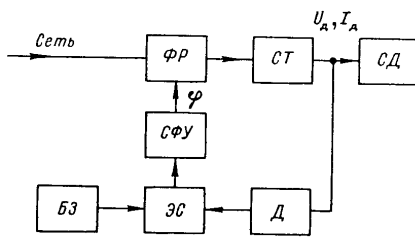


Рис. 3.16. Структурная схема тиристорного трансформатора

тику, причем в первом случае дуговое напряжение, а во втором сварочный ток не будут зависеть как от основных, так и от дополнительных возмущений.

Внешние характеристики промежуточной крутизны могут быть получены двумя способами. Первый, простейший, способ, связанный со снижением коэффициента усиления системы авторегулирования, имеет серьезные недостатки. Одновременно с изменением наклона внешних характеристик снижается степень стабилизации основного параметра от воздействия дополнительных возмущений, нарушается параллельность внешних характеристик. Для ослабления этих явлений замкнутую систему регулирования обычно дополняют регулятором косвенного действия. Например, в трансформаторах серии ТДФЖ для защиты сварочного процесса от колебаний напряжения сети из сигнала задания вычитается сигнал, пропорциональный напряжению сети.

Качественное управление крутизной внешних характеристик с отработкой всех дополнительных возмущений может быть достигнуто использованием замкнутой системы автоматического регулирования, имеющей возможно малое значение ошибки, в сочетании с устройством, реагирующим на основное возмущение. Так, в системах с ЖВХ в блоке задания дугового напряжения необходимо из задающего опорного сигнала вычесть сигнал, пропорциональный значению сварочного тока.

**Блок задания регулируемой величины.** Напряжение на выходе блока задания может быть неизменным, изменяться, как было показано выше, под действием основных или дополнительных возмущений или изменяться во времени по определенному закону или программе. В последнем случае блок задания является временным программатором сварочного режима. Устройство программатора сварочного тока для аргодуговой сварки неплавящимся электродом в непрерывном и импульсном режимах будет рассмотрено в главе четвертой. В отдельных случаях, например в системе комплексной автоматизации станов для сварки труб большого диаметра, функции программатора выполняет ЭВМ, обеспечивающая управление группой трансформаторов. Автоматизация предъявляет к системам автоматического регулирования ТТ требования идентичности регулировочных характеристик, уменьшения статической и динамической ошибок регулирования.

**Датчики сварочного тока и напряжения дуги.** Важнейшим звеном системы автоматического регулирования является датчик сигнала обратной связи по регулируемому параметру. Датчиком сигнала обратной связи по сварочному току в ТТ с падающими внешними характеристиками обычно служит трансформатор тока, первичной обмоткой которого является сварочный провод. Трансформатор тока может быть выполнен на стержневом или тороидальном магнитопроводе. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на резистор обратной связи, в котором рассеивается мощность  $P_{o.c} = I_d U_{o.c} / w_2$ , где  $I_d$  — ток дуги;  $U_{o.c}$  — требуемый сигнал обратной связи по току;  $w_2$  — число витков вторичной обмотки трансформатора тока. Обычно величина  $U_{o.c}$  не превышает 10 В. Увеличение числа витков приводит к снижению мощности резис-

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ  
ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1. ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗБУДИТЕЛИ  
И СТАБИЛИЗАТОРЫ ГОРЕНИЯ ДУГИ

При сварке неплавящимся, а в ряде случаев и плавящимся электродом нежелательно или недопустимо зажигание дуги касанием электрода об изделие. В этих случаях первоначальный поджиг дуги производят путем пробоя дугового (межэлектродного) промежутка высоковольтными высокочастотными импульсами напряжения. Предназначенные для этой цели электрические генераторы получили название возбудителей горения дуги или осцилляторов.

Известно, что эффективность работы возбудителей повышается, если момент генерации импульсов согласован с фазой напряжения источника питания дуги. Так, при аргодуговой сварке легких сплавов первоначальное возбуждение дуги наиболее вероятно в полупериоды обратной полярности (катод—изделие). Оптимальный момент генерации и пробоя дугового промежутка соответствует фазе напряжения 70—80°. Процесс нарастания сварочного тока в образовавшемся проводящем канале будет проходить без бросков при максимальной скорости нарастания, что будет способствовать развитию и становлению дугового разряда.

Многообразные схемы возбудителей могут быть подразделены на две основные группы — непрерывным и импульсным питанием.

Основы построения первой группы возбудителей закладывались в 50-е годы, когда еще не имели широкого распространения силовые тиристоры и полупроводниковые схемы управления.

В возбудителях с непрерывным питанием (рис. 4.1) источником высокого напряжения является высоковольтный трансформатор  $T2$  с повышенным электромагнитным рассеянием, рассчитанный на полное напряжение сети и подключаемый к сети выключателем  $SA1$  на все время работы возбудителя. Источниками высокой частоты в таких возбудителях, как правило, служат искровые генераторы.

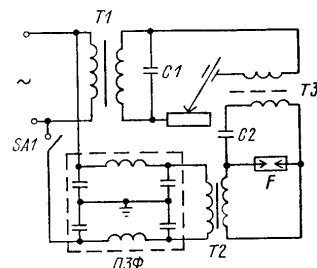
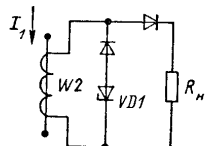


Рис. 4.1. Возбудитель горения дуги с непрерывным питанием

Рис. 3.17. Схема датчика полувольты тока



тора, но при этом увеличивается трудоемкость изготовления трансформатора тока.

В ТТ с воздушной реакторной обмоткой в окне силового трансформатора сигнал обратной связи по току может поступать непосредственно с реакторной обмотки, ЭДС которой пропорциональна значению сварочного тока. Если реакторная обмотка включена в первичную цепь силового трансформатора, то должна быть использована трансформаторная развязка, исключающая попадание высокого напряжения в схему фазового управления током.

В ТТ с регулируемой постоянной составляющей сварочного тока должно быть два датчика тока: в цепях тиристоры прямой и обратной полярности дуги. При проектировании трансформатора тока для полуволнового датчика необходимо предусмотреть цепь спада магнитного потока магнитопровода, работающего на частом гистерезисном цикле. Для этого удобно использовать стабилитрон  $VD1$  (рис. 3.17) с напряжением стабилизации, превышающим среднее значение напряжения на активных сопротивлениях вторичной цепи трансформатора тока в рабочий полупериод:  $U_{ст} \geq I_{1cp}(R_n + R_2)/w_2 = U_{cp}$ , где  $I_{1cp}$  — среднее значение тока тиристора;  $R_n$  — сопротивление нагрузки датчика;  $R_2$  — сопротивление вторичной обмотки;  $w_2$  — число ее витков. Точность показаний датчика зависит от рабочего диапазона индукции магнитопровода, который не следует принимать выше 0,3 Тл:

$$\Delta B = U_{cp} \cdot 10^{-2} / (w_2 s) \leq 0,3 \text{ Тл},$$

где  $s$  — сечение магнитопровода,  $m^2$ .

Датчики напряжения, используемые для формирования жесткой характеристики, обычно представляют собой резисторные делители, подключенные к выходным зажимам ТТ. При больших падениях напряжения в сварочных проводах ( $I_d x_{пр}$ ) точность поддержания заданного значения напряжения дуги снижается. В таких случаях целесообразно брать сигнал обратной связи непосредственно с изделия и сварочной головки.



Разрядник  $F$ , конденсатор  $C2$  и первичная обмотка высокочастотного выходного трансформатора  $T3$  (или обмотка выходного дросселя) образуют колебательный контур высокочастотного генератора. Вторичная обмотка выходного трансформатора  $T3$  (или обмотка дросселя) может подключаться параллельно дуговому промежутку или включаться последовательно в сварочный контур, как показано на рис. 4.1.

Защита источника сварочного тока  $T1$  от напряжения высокой частоты в возбудителях последовательного включения осуществляется конденсатором фильтра  $C1$ . Как известно [8], возбудители последовательного включения более эффективны, так как в них практически вся энергия возбудителя выделяется в дуговом промежутке, в то время как в возбудителях параллельного включения часть энергии ответвляется во включенный между возбудителем и источником тока защитный  $LC$ -фильтр.

Конденсатор  $C2$  заряжается от трансформатора  $T2$  до напряжения пробоя разрядника, после чего в контуре возникают высокочастотные затухающие колебания, частота которых зависит от параметров контура, а амплитуда — от напряжения пробоя разрядника. После восстановления электрической прочности разрядника процесс повторяется. За каждый полупериод напряжения питания возбудитель генерирует 10–15 затухающих высокочастотных импульсов с интервалом около 0,5 мс. Собственная частота колебания в таких генераторах составляет 0,2–2 МГц, напряжение 3–6 кВ, энергия одного импульса не превышает 0,1 Дж.

Путем настройки разрядника начало генерации согласуют с фазой напряжения питания ( $40$ – $50^\circ$ ), которое должно быть в фазе с напряжением источника сварочного тока.

Возбудители с непрерывным питанием имеют ряд серьезных недостатков. Наличие сложного и громоздкого низкочастотного высоковольтного трансформатора обуславливает высокую материалоемкость изделий. Наличие высокого напряжения низкой частоты делает такие возбудители источниками повышенной опасности для персонала. Наличие искрового генератора, генерирующего широкий спектр частот, повышает уровень радиопомех, создаваемых возбудителем; этому же способствует и большая повторяемость генераций (10–15 в полупериод), эффективность которых, как было показано ранее, невысока.

Несмотря на то что такие возбудители снабжаются громоздкими помехозащитными фильтрами  $ПЗФ$  (рис. 4.1), уровень радиопомех не удается снизить до допустимых норм. Поэтому время работы и частота включения таких возбудителей должны быть строго ограничены — их следует отключать сразу же после возбуждения дуги.

Совокупность этих недостатков характеризует возбудители с непрерывным питанием как устаревшие изделия. Однако в связи с простотой схемы и конструкции они до настоящего времени широко используются в промышленности и даже продолжают выпускаться рядом неспециализированных предприятий.

Вторая группа возбудителей, с импульсным питанием, строится на основе схем тиристорных формирователей импульсов с емкостным накопителем энергии. Заряд накопителя происходит от вспомогательного маломощного источника постоянного напряжения, разряд — через тиристор на первичную обмотку повышающего импульсного трансформатора. Генерация импульсов производится один раз в полупериод сетевого напряжения, причем момент генерации строго согласуется с выбранной фазой ( $70$ – $80^\circ$ ) напряжения источника сварочного тока.

В возбудителях с импульсным питанием первого поколения в качестве импульсного трансформатора широко использовали катушку зажигания двигателей внутреннего сгорания (бобину). Во вторичной цепи импульсного трансформатора устанавливали искровой генератор. Как и возбудители непрерывного питания, такие импульсные возбудители являются источниками радиопомех высокого уровня и после возбуждения дуги их необходимо отключать от сети.

Однако и после возбуждения дуги переменного тока нередко существует необходимость искусственной стабилизации ее горения. Для облегчения повторного зажигания дуги при смене ее полярности служат импульсные стабилизаторы горения дуги.

Применение стабилизаторов необходимо при аргонодуговой сварке легких сплавов. Рекомендуемые параметры импульсов: амплитуда напряжения 500–600 В, амплитуда тока импульсов 60–80 А, длительность импульса не ниже 60 мкс. Импульсы должны генерироваться через 60–100 мкс после смены полярности сварочного тока (дугового напряжения) один раз в период при формировании катода на алюминии.

Стабилизаторы строятся также на основе схем тиристорно-емкостных формирователей.

Возбудители-стабилизаторы установок УДГУ-301 и УДГ-501-1 завода "Электрик" имени Н. М. Шверника работают в двух режимах, но имеют единые емкостный накопитель и тиристорный коммутатор. В режиме возбуждения дуги формирователь работает на высоковольтный трансформатор (бобину) и далее на искровой генератор, в режиме стабилизации — непосредственно на выходной дроссель, включенный последовательно в сварочный контур. Переключение с одного режима на другой производится контактами реле, катушка которого включена на вторичную обмотку сварочного трансформатора; реле срабатывает при напряжении холостого хода и отключается при напряжении дуги.

В последние годы во ВНИИЭСО разработано устройство, в котором функции возбудителя и стабилизатора полностью совмещены.

Возбудитель-стабилизатор ВСД-01У3 предназначен для возбуждения и стабилизации горения дуги при аргонодуговой сварке и может применяться для стабилизации горения дуги при сварке качественными штучными электродами, предназначенными для сварки на постоянном токе.

Аппарат ВСД-01У3 выпускается в универсальном однокорпусном исполнении.

Возбудитель-стабилизатор подключается к сети переменного тока параллельно со сварочным трансформатором  $T1$  (рис. 4.2) и управляется от напряжения на его вторичной обмотке. Оптимальным является выбор таких параметров элементов схемы, которые обеспечивают рассматриваемый далее резонансно-диодный режим работы устройства.

Накопительный конденсатор  $C3$  заряжается от вспомогательного малоомощного источника постоянного тока (ИПТ) через зарядный дроссель  $L1$  и диод  $VD1$ ; после окончания резонансного заряда на конденсаторе установится напряжение, близкое к двойному значению напряжения ИПТ. При включении тиристора  $VS1$  произойдет резонансный разряд конденсатора  $C3$  на первичную обмотку высокочастотного трансформатора  $T2$  с ферритовым магнитопроводом. Высокая добротность контура обеспечивает перезаряд конденсатора до напряжения, близкого к двойному обратному напряжению. При следующем цикле заряда конденсатора зарядный ток определяется суммой напряжения ИПТ и согласного с ним напряжения конденсатора  $C3$ . Происходит циклический рост напряжения на конденсаторе. С учетом активных потерь в контурах напряжение на конденсаторе установится равным 4–5-кратному значению напряжения ИПТ.

Такой режим работы схемы позволяет значительно уменьшить емкость конденсатора, обеспечить работу высокочастотного трансформатора в режиме симметричного перемагничивания, снизить коэффициент трансформации трансформатора и его массу.

В связи с тем что генерация импульсов производится с частотой 100 Гц, заряд и разряд конденсатора  $C3$  происходят в течение одного полупериода сетевого напряжения; при этом собственная частота колебаний зарядного контура в 3–4 раза превышает частоту сети.

Собственная частота разрядного контура около 20 кГц. Разрядный ток имеет практически синусоидальную форму, напряжение на обмотках

трансформатора  $T2$  изменяется по закону косинуса. Мгновенно нарастающий импульс напряжения во вторичной обмотке, шунтированный высокочастотным конденсатором  $C2$ , обеспечивает в этом контуре ударное возбуждение высокочастотных колебаний с частотой 2–3 МГц, которые поступают на дуговой промежуток через конденсатор высокочастотного фильтра  $C1$ .

Цепь управления тиристором  $VS1$  содержит оптронный тиристор  $VS2$  и конденсатор  $C4$ , заряженный по цепочке  $R3, VD3$ .

Светодиод тиристора  $VS2$  включен на выходе транзистора  $VT1$ , управляемого операционным усилителем  $DA1$ . Прямой вход усилителя подключен к нулевой точке схемы, и, следовательно, усилитель включается (насыщается) при поступлении на его инверсный вход отрицательного потенциала. Этот момент определяет угол включения возбудителя-стабилизатора дуги. Стабилитрон  $VD2$  защищает вход усилителя от перенапряжений.

Потенциал инверсного входа усилителя зависит от состояния схемы, собранной на транзисторах  $VT2, VT3$ , диодах  $VD4–VD7$ , резисторах  $R6–R16$ . На схему поступает напряжение со вторичной обмотки сварочного трансформатора  $T1$ . В полупериоды обратной полярности напряжения холостого хода или дуги (плюс на электроде) происходит заряд (или подзаряд) конденсатора  $C5$  через диод  $VD4$  и резисторы  $R6, R7$ , транзистор  $VT3$  при этом открыт. Потенциал коллектора транзистора  $VT3$  равен нулю, а потенциал коллектора транзистора  $VT2$  определяется потенциалом конденсатора  $C5$ .

В полупериод прямой полярности транзистор  $VT2$  открыт, а потенциал коллектора транзистора  $VT3$  определяется потенциалом конденсатора  $C6$ .

Напряжение на инверсном входе усилителя в каждый полупериод определяется разностью усредненного и мгновенного напряжений своей полуволны, снимаемых соответственно с конденсатора  $C5$  (или  $C6$ ) и резисторов  $R11, R12$ . В момент сравнения этих напряжений в каждый полупериод происходит включение усилителя  $DA1$  и, следовательно, возбудителя-стабилизатора.

При холостом ходе возбудитель-стабилизатор включается при одинаковой фазе 70–80°, подстраиваемой резистором  $R12$ . При напряжении дуги включение возбудителя-стабилизатора происходит в момент смены полярности сварочного тока и достижения напряжением на дуге некоторого уровня, своего для каждой полуволны, определяемого напряжением на конденсаторе  $C5$  или  $C6$ .

Благодаря отсутствию искрового генератора уровень помех радиоприему соответствует установленным нормам и возбудитель-стабилизатор может работать в длительном режиме, генерируя импульсы напряжением 5 кВ, с энергией до 0,7 Дж.

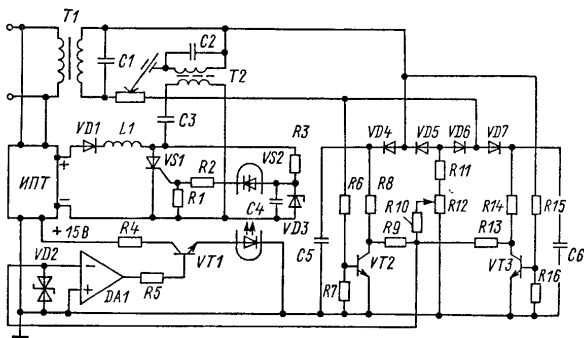


Рис. 4.2. Импульсный возбудитель-стабилизатор горения дуги

#### 4.2. СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА

В § 1.2 рассмотрены физические причины появления постоянной составляющей тока при сварке, показано ее неблагоприятное влияние на энергетические показатели и сварочные свойства источников тока и обоснована необходимость ее устранения или ограничения до требуемых по технологическим соображениям значений.

До недавнего времени в промышленности для полного или частичного устранения постоянной составляющей тока использовались два способа: включение последовательно в сварочную цепь конденсаторной батареи или резистора, шунтированного силовым диодом.

Первый способ обеспечивает полное устранение постоянной составляющей тока. В 50–60-е годы он широко использовался в зарубежных и отечественных специализированных установках для аргодуговой сварки. Для его осуществления отечественной промышленностью были разработаны специальные электролитические неполярные конденсаторы серии ЭС-1000 на 1000 мкФ, 12 В. В установках УДАР-300 и УДГ-301 завода "Электрик" имени Н. М. Шверника на ток 315 А батарея содержала 100 таких конденсаторов, соединенных параллельно; ее масса составляла 45–50 кг, стоимость 140 руб. В установках УДАР-500 и УДГ-501 использовалось по 150 конденсаторов. Отказ от использования конденсаторных батарей обусловлен технико-экономическими соображениями.

Второй способ получил распространение в основном при создании сборных сварочных постов для аргодуговой сварки. Полярность диода выбирается такой, чтобы он пропускал ток в полупериоды обратной полярности. В полупериоде прямой полярности диод закрыт

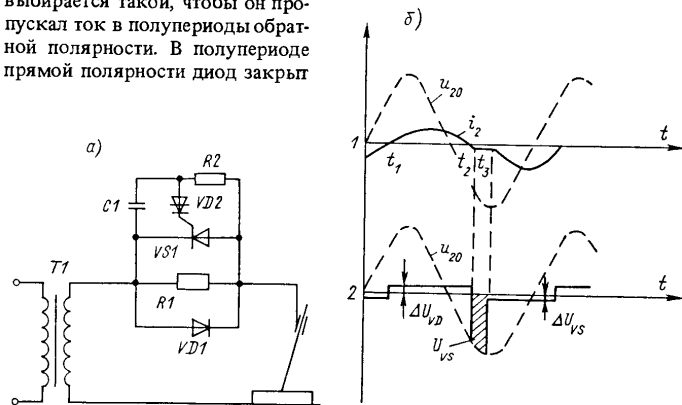


Рис. 4.3. Схема устройства ограничения постоянной составляющей тока (а) и диаграммы напряжений и токов (б)

и значение тока ограничено резистором, подключенным параллельно диоду. Чтобы устранить постоянную составляющую тока при различных режимах сварки, резистор должен быть переменным. Недостаток такого устройства — необходимость его перенастройки при изменении режима сварки и значительные энергетические потери при прохождении прямой полуволны тока через резистор.

С началом использования в сварочной технике силовых тиристоров появились новые, более эффективные и экономичные способы ограничения постоянной составляющей тока.

Анализ динамики роста постоянной составляющей тока при фазовом регулировании, проведенный в § 1.2, показал возможность эффективного ограничения постоянной составляющей тока путем встречно-параллельного включения в сварочную цепь диода для пропуска полуволны тока обратной полярности и тиристора для пропуска полуволны тока прямой полярности. Момент включения тиристора должен соответствовать некоторому углу  $\varphi_{кр}$ , при котором длительность протекания тока прямой полярности равна половине периода  $\pi$ . Угол включения  $\varphi_{кр}$  можно отсчитывать от нуля сетевого напряжения, или можно ввести задержку на время  $\tau$  относительно момента окончания полуволны тока обратной полярности, т. е. появления анодного напряжения на тиристоре.

На этой основе во ВНИИЭСО разработано новое [5] диодно-тиристорное устройство ограничения постоянной составляющей тока в источниках с амплитудным регулированием тока (трансформаторы с подмагничиваемым шунтом, подвижными обмотками и т. д.). Во вторичную цепь сварочного трансформатора  $T1$  (рис. 4.3) включен двухполюсник, состоящий из встречно-параллельно включенных диода  $VD1$ , тиристора  $VS1$  с линией задержки на включение и резистора  $R1$ . Линия задержки содержит конденсатор  $C1$ , резистор  $R2$  и переключающий диод  $VD2$ .

В полупериод обратной полярности  $t_1 - t_2$  (рис. 4.3, б, ось 1) сварочный ток  $i_2$  беспрепятственно проходит через диод  $VD1$ ; напряжение на двухполюснике определяется прямым падением напряжения на диоде  $\Delta U_{VD}$  (рис. 4.3, б, ось 2).

После прекращения тока обратной полярности (момент  $t_2$ ) наступает пауза основного тока, ток дуги поддерживается через резистор  $R1$ . Напряжение на двухполюснике скачком возрастает до значения  $U_{VS}$ , близкого к значению напряжения холостого хода трансформатора  $u_{20}$ . Начинается заряд конденсатора  $C1$  через резистор  $R2$  линии задержки. По истечении заданного времени  $\tau = t_2 \dots t_3$  (около 1 мс) включается диод  $VD2$  и конденсатор разряжается на управляющий переход тиристора  $VS1$ , последний включается и начинается полупериод тока прямой полярности. Напряжение на двухполюснике скачком падает до значения прямого падения напряжения на тиристоре  $\Delta U_{VS}$  (рис. 4.3, б, ось 2). Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R1$ , незначительна, поскольку резистор пропускает ток только во время задержки на включение тиристора.

Сопротивление резистора выбирается из условия поддержания минимального тока дуги.



Устройство не требует переналадки при изменении режима сварки и обеспечивает ограничение постоянной составляющей сварочного тока до уровня, не превышающего 10–12% от действующего значения тока.

Всесторонние сварочные испытания устройства дали положительные результаты. Устройство внедрено в модернизированных серийных установках УДГ-301-1, УДГУ-301 и УДГ-501-1 завода "Электрик" имени Н. М. Шверника взамен батарей электролитических неполярных конденсаторов.

В источниках питания переменного тока с тиристорным регулированием отдельное устройство подавления постоянной составляющей тока не требуется. В этих источниках предусматриваются две отдельные системы авторегулирования для тока прямой и обратной полярности [4]. Каждая система регулирования содержит свой задачник значения тока, датчик тока, включенный последовательно с соответствующим тиристором, и формирователь импульсов управления для этого тиристора. Уставками задачиков тока прямой и обратной полярности могут быть заданы значение и полярность постоянной составляющей тока или предусмотрена ее полная компенсация. При этом поддержание заданного значения постоянной составляющей тока осуществляется системами авторегулирования независимо от степени выпрямляющего действия дуги, ее длины и других факторов режима сварки.

#### 4.3. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЦИКЛОМ СВАРКИ

Установки для аргонодуговой сварки снабжаются аппаратурой, обеспечивающей определенный цикл сварки.

По команде оператора на включение цикла:

включается электрогазовый клапан (ЭГК) и начинается подача защитного газа;

включается источник тока дежурной дуги;

с выдержкой времени, необходимой для продувки газовых шлангов, включается возбудитель-стабилизатор горения дуги (ВСД).

После возбуждения дуги (поступления сигнала наличия дуги) начинается плавное нарастание рабочего сварочного тока; далее идет процесс сварки в непрерывном или импульсном режиме.

По команде оператора на выключение сварки начинается плавное падение рабочего тока — "заварка кратера".

По окончании "заварки кратера":

отключаются ВСД и источник тока;

с выдержкой времени, обеспечивающей газовую защиту зоны шва, отключается ЭГК.

Рассмотрим технологический цикл аргонодуговой сварки и пример реализации схемы цикла на основе интегральных аналоговых и дискретных микросхем. Предположим, что источник питания и сварочная горелка имеют принудительное воздушное и водяное охлаждение, сварка должна производиться в непрерывном и импульсном режимах, с регули-

руемой длительностью нарастания тока и заварки кратера шва, с управлением временем продувки газового тракта в начале цикла и временем газовой защиты кратера шва в конце цикла сварки.

На рис. 4.4 приведены структурная схема блока цикла сварки и диаграмма сигналов управления.

При включении оператором кнопки, установленной на сварочной горелке, замыкается цепь, состоящая из последовательно включенных контактов кнопки, ветрового реле и гидрореле. Замкнутому состоянию трех этих контактов соответствует сигнал "сварка" на выходе формирователя сигнала "сварка" (ФСС). Под воздействием этого сигнала появляется напряжение холостого хода на выходных зажимах источника тока (ИТ), срабатывают реле газа (РГ) и клапан (ЭГК), реле возбудителя-стабилизатора дуги (РВСД) и ВСД. На вход усилителя, суммирующего сигналы задания сварочного тока (СУ), поступает сигнал с блока задания дежурного тока (БЗДТ).

РВСД выполнено с регулируемой выдержкой времени на срабатывание, в течение которой продуваются газовые шланги.

После первого-второго импульса ВСД устанавливаются полуволны дежурного тока обратной полярности. После разогрева вольфрамового электрода устанавливается дежурный ток прямой полярности. Начи-

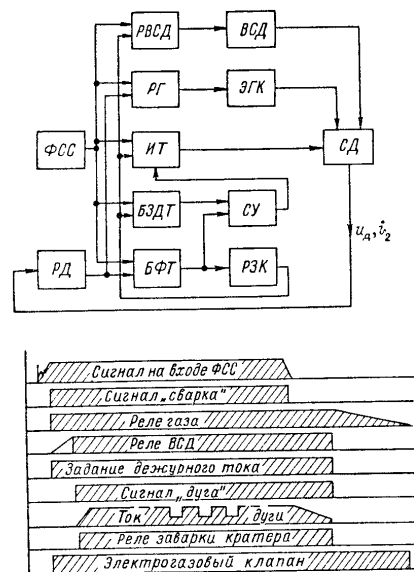


Рис. 4.4. Структурная схема блока цикла сварки и диаграмма сигналов управления

нается нормальный процесс горения дуги при дежурном токе. Возбуждение дуги на сравнительно малом дежурном токе предохраняет электрод от разрушения; сварочный шов не загрязняется включениями вольфрама.

Наличие тока и напряжения сварочной дуги (СД) фиксируется реле дуги (РД). Сигнал "дуга" с выхода РД блокирует РГ (т. е. обеспечивает работу ЭГК при снятии сигнала "сварка") и дает команду в блок формирования тока (БФТ) на нарастание рабочего сварочного тока, который поступает на ИТ через СУ. Нарастающий сигнал задания тока на выходе БФТ вызывает срабатывание реле заварки кратера (РЗК), которое обеспечивает блокировку сигнала "сварка" на выходе РВСД, ИТ и БЗДТ. По окончании нарастания сварочного тока устанавливается заданный режим непрерывной или импульсной сварки.

При опускании кнопки на сварочной горелке, или при нарушении в системе охлаждения установки, сигнал "сварка" снимается и начинается плавное снижение сигнала задания сварочного тока на выходе БФТ. Идет заварка кратера шва. По окончании заварки кратера отпускает реле дуги отпускает. РГ выполнено с выдержкой времени на опускание, в течение которой остывающий сварной шов защищается газом. Реле газа выключает ЭГК. Цикл закончен.

На рис. 4.5 приведены примеры реализации ФСС, РЗК, РВСД ("выдержка на включение"), РГ ("выдержка на отключение") и РД.

В ФСС (рис. 4.5, а) для развязки электронной схемы управления и контакта кнопочного выключателя  $S$  горелки применено электромагнитное реле  $K$ . Цепь питания катушки реле  $K$  содержит последовательно включенные кнопочный выключатель  $S$  и не показанные на рисунке контакты ветрового реле и гидрореле. При замыкании контакта  $K$  реле на выходе микросхемы  $DI.2$  появится "логическая 1" — сигнал "сварка". Для устранения дребезга контакта использован фильтр  $R1, R2, C1$ .

Схемы РЗК, РВСД, РГ и РД (рис. 4.5, б-д) выполнены на базе триггера Шмитта на интегральном операционном усилителе ( $A1$  — рис. 4.5, б-г и  $A1, A2$  — рис. 4.5, д). Порог срабатывания триггера устанавливается соотношением сопротивлений резисторов  $R3-R5$  ( $R3-R5, R13-R15$  — рис. 4.5, д). РКЗ (рис. 4.5, б) срабатывает при появлении небольшого отрицательного сигнала, поступающего на его вход при нарастании напряжения на времязадающем конденсаторе  $C1$  блока БФТ (см. рис. 4.6).

В РВСД и РГ (рис. 4.5, в, г) при поступлении "логической 1" на вход микросхемы  $DI.1$  (схема "И" с открытым коллектором) начинается заряд конденсатора  $C1$ . Заряд происходит практически мгновенно в схеме РГ и медленно, с регулируемой резистором  $R1$  скоростью в схеме РВСД. При достижении потенциалом инверсного входа усилителя  $A1$  порогового значения происходит переключение триггера. Диод  $VD1$  закрывается, "логический 0" на выходе микросхемы  $DI.2$  вызывает срабатывание электромагнитного реле  $K$ . Снятие сигнала с входов РВСД

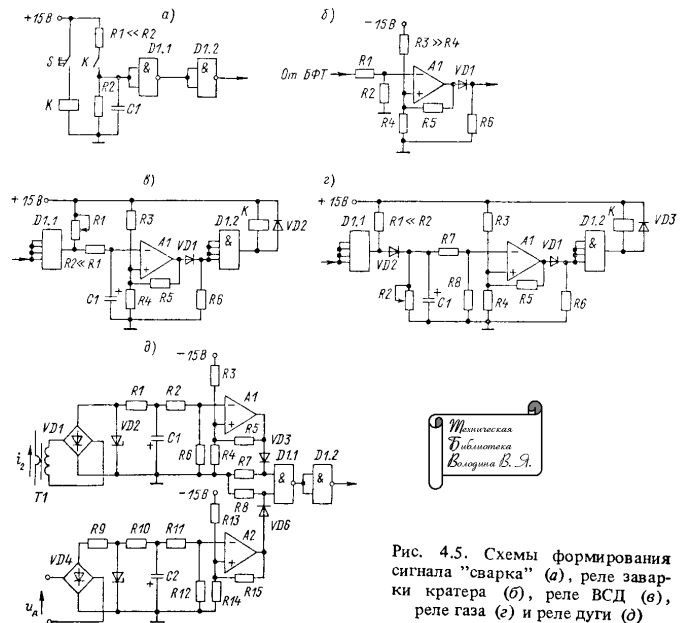


Рис. 4.5. Схемы формирования сигнала "сварка" (а), реле заварки кратера (б), реле ВСД (в), реле газа (г) и реле дуги (д)

и РГ приводит к разряду конденсатора  $C1$ , причем скорость разряда в схеме РГ регулируется резистором  $R2$ , а в схеме РВСД разряд происходит практически мгновенно. При снижении потенциала инверсного входа схемы  $A1$  ниже порогового значения реле  $K$  отключается.

Сигнал "дуга" поступает с выхода РД (рис. 4.5, д) при наличии сварочного тока прямой полярности  $i_2'$  и дугового напряжения  $u_d$ . Первичная обмотка трансформатора тока  $T1$  включена в цепь тиристора прямой полярности тиристорного регулятора сварочного тока или устройства подавления постоянной составляющей тока. РД построено на двух триггерах на элементах  $A1, R3-R5$  и  $A2, R13-R15$  и схеме совпадения на микросхемах  $DI.1, DI.2$ .

БФТ (рис. 4.6) преобразует установленные оператором значения амплитуды и длительности тока импульса и паузы, длительности нарастания тока и заварки кратера в аналоговый сигнал, управляющий режимом работы ИТ. Команда на нарастание сварочного тока, поступающая с ФСС и РД, переводит усилитель  $A1$  из одного насыщенного состояния в другое: напряжение на выходе усилителя скачком изменяется от  $+15$  до  $-15$  В. Конденсатор  $C1$  заряжается через диод  $VD2$ , скорость заряда определяется уставкой резистора  $R5$  время нарастания

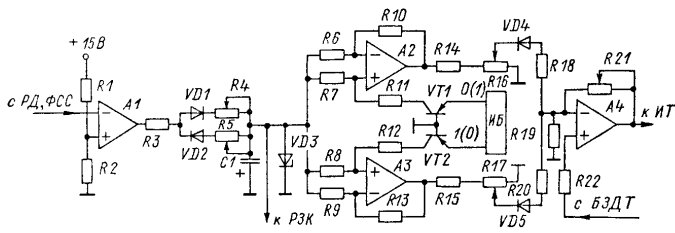


Рис. 4.6. Схема блока формирования тока и сумматора сигнала задания рабочего и дежурного тока

сварочного тока". Напряжение на конденсаторе растет практически линейно до значения напряжения стабилизации стабилитрона  $VD3$  (около  $-7,5$  В). При снятии входного сигнала с БФТ конденсатор  $C1$  перезаряжается через диод  $VD1$  и резистор  $R4$  ("время заварки кратера"). Перезаряд происходит под действием напряжения  $+15$  В практически линейно до момента смены полярности и отпирания диода  $VD3$ .

Время задающее напряжение с конденсатора  $C1$  поступает на РЗК и через ключевые повторители, выполненные на усилителях  $A2, A3$  и резисторах  $R6-R13$ , на потенциометры задания амплитуды импульса  $R16$  и паузы  $R17$ . Напряжения с потенциометров  $R16, R17$  и с БЗДТ поступают на входы суммирующего усилителя, выполненного на микросхеме  $A4$ , и далее на вход ИТ.

Сопротивления резисторов  $R6-R13$  равны, и коэффициент передачи по напряжению усилителей  $A2$  и  $A3$  принимает значение "1" или "0" в зависимости от состояния транзисторных ключей  $VT1$  и  $VT2$ . Так, при наличии положительного потенциала на эмиттере транзистора  $VT2$  напряжение на выходе усилителя  $A3$  равно нулю, напряжение на выходе усилителя  $A2$  равно напряжению на время задающем конденсаторе  $C1$ , на вход сумматора  $A4$  подан сигнал задания амплитуды тока импульса. Коммутацией ключей  $VT1$  и  $VT2$  управляет импульсный блок ИБ.

Импульсный блок (рис. 4.7) преобразует заданные цифровым набором на переключателях  $SI.1-SI.4$  значения длительности импульса и паузы тока в сигналы с амплитудой  $+15$  В и заданной продолжительностью. Тактовый генератор на микросхемах  $DI.1-DI.3$  подбором значения сопротивления резистора  $R1$  настроен на частоту 1000 Гц. Счетчики  $D5-D8$  уменьшают частоту генерируемых импульсов каждый в 10 раз; на выходе  $D7$  частота равна 1 Гц (период 1 с). Каждому числу (от 1 до 9) импульсов, поступивших на вход 6 счетчика  $D7$  ( $D8$ ), соответствует определенный набор "1" и "0" на его выходных контактах 10, 1, 13, 3, что иллюстрируется рис. 4.8. После прохождения 10-го входного импульса счетчик за счет внутренних связей устанавливается в нулевое состояние.

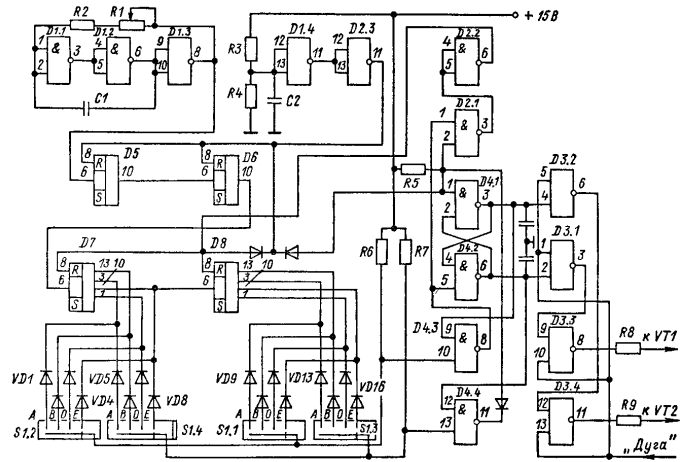


Рис. 4.7. Схема импульсного блока

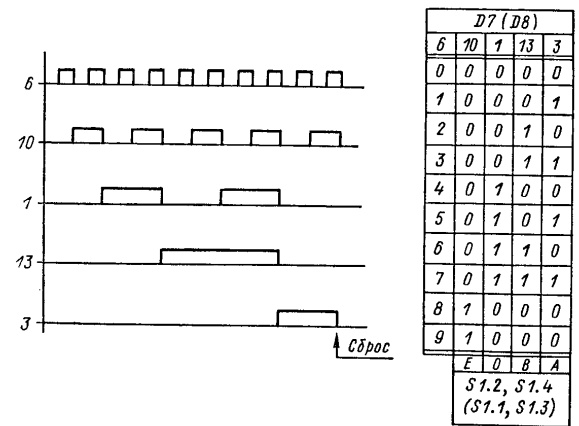


Рис. 4.8. Диаграмма работы счетчика импульсов

Декадные переключатели  $S1.1-S1.4$  преобразуют заданное десятичное число, соответствующее времени импульса или паузы, в набор замкнутых или разомкнутых контактов  $A, B, O, E$ . На переключателях  $S1.1, S1.2$  набираются длительности импульса сварочного тока соответственно в целых и десятых долях секунды, на переключателях  $S1.3, S1.4$  — паузы.

Работой транзисторных ключей  $VT1, VT2$  (блока БФТ) управляет триггер, выполненный на микросхемах  $D4.1, D4.2$ . Сигнал "1" на выходе 3 и сигнал "0" на выходе 6 триггера при наличии сигнала "дуга" на контактах микросборки  $D3$  обеспечивают сигнал "0" на выходе 8 и "1" на выходе 11 микросборки  $D3$ : транзистор  $VT2$  открыт,  $VT1$  закрыт, идет отсчет времени импульса.

При совпадении комбинации "1" и "0" на выходе счетчиков  $D7, D8$  с набором замкнутых контактов переключателей длительности импульса  $S1.1, S1.2$  группы диодов  $VD1-VD4, VD9-VD12$ , замыкающие положительный потенциал схемы через резистор  $R6$  на "землю", оказываются закрытыми и на вход 10 схемы совпадения  $D4.3$  поступит сигнал "1". Поскольку на оба входа микросхемы  $D4.3$  поданы "1", на ее выходе появится сигнал "0". Под воздействием этого сигнала триггер меняет свое состояние, открывается транзистор  $VT1$ , закрывается  $VT2$ , на выходе 6 микросхемы  $D2.2$  формируется сигнал "0", который поступает на входы 8 "обнуления" счетчиков  $D7, D8$  и приводит их в исходное состояние. Закончился отсчет времени импульса, начался отсчет времени паузы.

По окончании отсчета времени паузы на вход 13 схемы совпадения  $D4.4$  поступит сигнал "1". Произойдет "обнуление" счетчиков, перебрис триггера и т. д.

Если длительность паузы установить равной нулю, то на входе 13 микросхемы  $D4.4$  постоянно будет "1": транзистор  $VT1$  постоянно закрыт, в нагрузке установится постоянный ток, соответствующий заданной амплитуде тока импульса.

При обрыве сварочной дуги или случайном касании электродом изделия сигнал "дуга" с микросборки  $D3$  снимается, транзисторы  $VT1, VT2$  откроются и на источник тока поступит только сигнал задания с блока дежурного тока.

Схема, построенная на элементах  $D1.4, D2.3, R3, R4, C2$ , при включении импульсного блока в работу "обнуляет" все счетчики и устанавливает триггер в состояние "отсчет времени импульса", т. е. используется для обеспечения исходного состояния блока.

Взаимодействием узлов аппаратуры управления циклом сварки управляет логическая схема на микросборках  $D1$  и  $D2$  (рис. 4.9). Две микросхемы  $D1.1$  и  $D1.2$  составляют схему "И", остальные — две схемы "ИЛИ". Сигнал с выхода микросхемы  $D1.4$  управляет работой реле ВСД и включением (отключением) источника тока. Этот же сигнал, уменьшенный по амплитуде делителем  $R1, R2$ , поступает на вход сумматора в качестве сигнала задания значения дежурного тока.

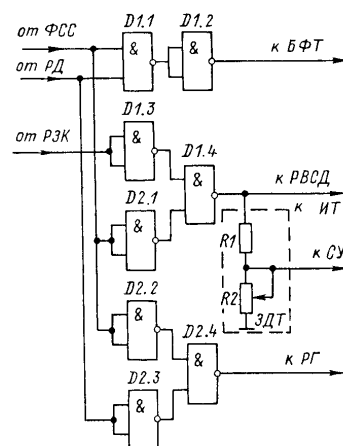


Рис. 4.9. Схема логической связи функциональных узлов блока цикла сварки

В рассмотренной аппаратуре управления циклом аргодуговой сварки использованы микросхемы  $K511ЛА1, K511ЛИ1$ , счетчики  $K511ИЕ1$  и операционные усилители  $K553УД2$ .

#### 4.4. ОГРАНИЧИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА

При проведении сварочных работ в особо опасных условиях (внутри металлических емкостей, на открытом воздухе и др.) для повышения электробезопасности сварщика при смене электрода трансформатор для ручной дуговой сварки должен быть снабжен устройством снижения напряжения холостого хода (УСНГ). УСНГ является вспомогательным средством защиты от поражения током.

Согласно ГОСТ 12.2.007.8-75 УСНГ должно снижать действующее напряжение холостого хода на выходных зажимах сварочной цепи до значения, не превышающего 12 В, не позже чем через 1 с после размыкания сварочной цепи.

К УСНГ предъявляются также дополнительные требования, обеспечивающие нормальную работу сварщика. Свариваемый металл может иметь различную степень загрязненности (ржавчина, окалина и т. п.). Поэтому УСНГ должно обладать определенной чувствительностью срабатывания, которая определяется максимальным сопротивлением сварочной цепи примерно 200 Ом. С другой стороны, для защиты человека при случайном его прикосновении к зажимам сварочной цепи УСНГ не должно срабатывать при сопротивлении сварочной цепи выше

500 Ом. Быстродействие срабатывания УСНТ должно составить 0,02–0,05 с.

Как правило, УСНТ, предназначенные для комплектации трансформаторов с механическим регулированием, выполняются отдельным блоком. В тиристорных трансформаторах функцию ограничения напряжения холостого хода выполняет схема управления, действующая на тиристорный фазорегулятор (ФР).

Схема ограничения напряжения холостого хода тиристорных трансформаторов. Требуемое пониженное значение напряжения холостого хода может быть обеспечено за счет частичного открытия тиристорных ФР (рис. 4.10, а) или за счет включения параллельно тиристорам RC-цепей (рис. 4.10, б). В первом случае в блоке задания тока, помимо задатчика рабочего режима, должен быть предусмотрен датчик режима холостого хода. Сигнал с блока задания рабочего тока обычно поступает на фазосдвигающее устройство через электронное реле, работой которого управляет токовый сигнал, поступающий с трансформатора тока, установленного в сварочной цепи. В момент замыкания электрода на изделие в сварочной цепи появляется токовый сигнал, срабатывают электронное реле и тиристорный ФР, на выходе трансформатора устанавливается рабочий режим. При повышении сопротивления рабочей цепи выше 500 Ом снимается сигнал рабочего тока и ФР частично или полностью закрывается.

На базе рассмотренных схем были выполнены экспериментальные образцы тиристорных трансформаторов ТТ-300 [17], опыт наладки и эксплуатации которых выявил серьезные недостатки этих схем. Вследствие разброса значений индуктивного сопротивления первичных обмоток трансформаторов возникает необходимость индивидуальной настройки сопротивления шунтирующего резистора или задатчика

режима холостого хода. Разброс значений сопротивления резистора вызывает разброс значений токовых сигналов во вторичной цепи трансформатора, что с учетом сравнительной близости порогов срабатывания и опускания устройства вызывает сложность настройки схемы управления. Построение схем связано с необходимостью обработки слабых сигналов, так как в качестве задатчика тока здесь используется трансформатор тока, рассчитанный на полный сварочный ток. Низкое значение напряжения холостого хода  $U_{x.x}$  (рис. 4.10, а, б) затрудняет возбуждение дуги на сильно окисленном или загрязненном изделии. Поэтому перспективной в новых разработках пред-

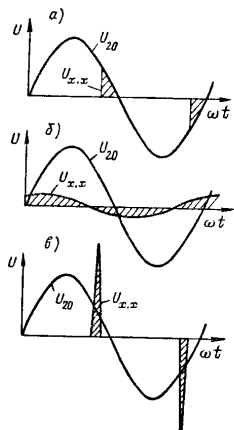


Рис. 4.10. Кривые напряжения холостого хода тиристорных трансформаторов с УСНТ

ставляется схема, основанная на импульсном измерении проводимости межэлектродного промежутка.

В режиме холостого хода в сварочную цепь инжектируется кратковременный (10–20 мкс) импульс напряжения с амплитудой 300–400 В (рис. 4.10, в). Действующее значение  $U_{x.x}$  при частоте наложения импульсов 100 Гц не превышает 12 В. Из-за своей малой длительности измерительные импульсы не представляют опасности для человека, но обеспечивают прохождение в сварочной цепи импульсов тока с амплитудой несколько ампер при высоком сопротивлении между электродом и изделием (до 200 Ом). Высокая скорость нарастания импульсного тока позволяет легко выделить его, например с помощью трансформатора тока с одним первичным витком, нагруженным на последовательно соединенные конденсатор и резистор. Импульсный сигнал с резистора подается в схему управления ТТ, а низкочастотный сигнал, пропорциональный сварочному току, выделяется на конденсаторе. Высоковольтный измерительный импульс будет способствовать пробоев межэлектродного промежутка и улучшению возбуждения сварочной дуги. УСНТ последнего типа особенно перспективно с тиристорными трансформаторами с цепью импульсной стабилизации, в которых стабилизирующий импульс может выполнять и функцию измерения.

УСНТ для трансформаторов с механическим регулированием. Для трансформаторов с механическим регулированием отечественная промышленность серийно выпускает устройство УСНТ-06. Устройство содержит управляемый релейной схемой электромагнитный контактор, замыкающий контакт которого включается последовательно в сварочную цепь между выходным зажимом вторичной обмотки трансформатора

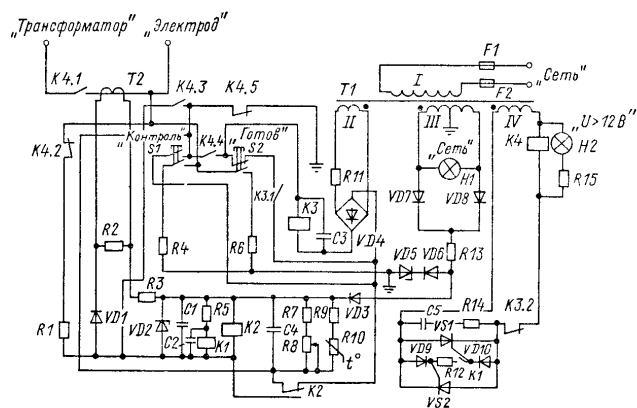


Рис. 4.11. Схема ограничителя УСНТ-06

тора и электрододержателем. Принципиальная схема устройства УСНТ-06 приведена на рис. 4.11.

В исходном состоянии при холостом ходе сварочного трансформатора силовой контакт *K4.1* контактора *K4* разомкнут и на электрод подается дежурное выпрямленное напряжение 12 В от обмотки *III* вспомогательного трансформатора *T1* через диоды *VD7*, *VD8* и *VD3*, резисторы *R13* и *R1*, обмотки реле *K1* и *K2*, размыкающий контакт *K4.2*.

При замыкании электрода на свариваемое изделие реле *K1* и *K2* выключаются.

Реле *K1* своим контакстом подает управляющие импульсы на тиристоры *VS1*, *VS2* и тем самым питание на катушку контактора *K4*, а реле *K2* своим переключающим контакстом *K2* подключает конденсатор *C4* к обмотке реле, обеспечивая выдержку времени на отключение.

При срабатывании контактора *K4* замыкается его контакт *K4.1* в силовой цепи, подавая рабочее напряжение трансформатора на электрод; вспомогательный размыкающий контакт *K4.2* отключает дежурное напряжение от силовой цепи. В процессе сварки питание реле осуществляется от трансформатора тока *T2*. После прекращения сварки в течение 1 с реле удерживаются во включенном состоянии за счет разряда конденсатора *C4*, а затем контакстом *K1* отключается силовой контактор *K4*. УСНТ приходит в исходное состояние.

С целью повышения электробезопасности в случае отказов элементов схемы (*VS1*, *VS2*, *K1* и др.), приводящих к ложному включению контактора *K4* и подаче полного напряжения холостого хода сварочного трансформатора на электрододержатель, в УСНТ предусмотрена цепочка аварийного отключения. Цепочка состоит из обмотки *II* трансформатора *T1*, резистора *R11*, диодного моста *VD4*, реле *K3*, конденсатора *C3*, замыкающего контакта *K4.4* и размыкающего контакта *K2*.

При ложном срабатывании контактора *K4* контакт *K2* не размыкается, а *K4.4* замыкается, при этом реле *K3* срабатывает с выдержкой времени, определенной конденсатором *C3*, и отключает контактор *K4* размыкающим контакстом *K3.2*.

Регулируемый резистор *R8* служит для корректировки, в случае необходимости, выдержки времени отключения напряжения холостого хода. Терморезистор *R10* предназначен для стабилизации выдержки времени при изменении температуры.

Проверка работоспособности УСНТ-06 осуществляется кнопками "Контроль" (*S1*) и "Готов" (*S2*). Максимальное сопротивление сварочной цепи в момент включения  $R_{вкл}$  имитируется резистором *R4* (номинальное сопротивление 150 Ом), минимальное сопротивление тела человека — резистором *R6* (номинальное сопротивление 500 Ом). При нажатии кнопки "Контроль" резистор *R4* замыкает сварочную цепь, срабатывает контактор *K4* и загорается лампа красного цвета *H2*. Одновременно начинается отсчет времени на срабатывание реле *K3*. Реле срабатывает, становится на блокировку через контакт *K3.1* и разрывает цепи питания обмотки контактора *K4*. Лампа *H2* гаснет. Нажатием кнопки "Готов" реле *K3* снимается с блокировки, сварочная цепь замы-

кается резистором *R6*. В исправном УСНТ контактор *K4* не срабатывает и лампа *H2* не загорается.

На правой боковой стенке УСНТ расположены: болт для заземления УСНТ, разъем подключения УСНТ к сети и два сетевых предохранителя *F1* и *F2*. Схема выполнена на съемной печатной плате, которая через разъем соединяется с остальными элементами УСНТ. Масса УСНТ-06 — 15 кг. Схема соединения блока УСНТ-06 со сварочными трансформаторами приведена в главе пятой.

#### 4.5. ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛИ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Электрододержатель является основным рабочим инструментом сварщика. Удобство работы сварщика определяется конструкцией электрододержателя. Электрододержатели должны обеспечивать установку и надежное закрепление покрытых металлических электродов в двух положениях: перпендикулярно и под углом не менее 115° к оси электрододержателя.

Токоведущие части электрододержателя должны быть изолированы; изоляция должна обеспечивать защиту от случайного соприкосновения руки сварщика и свариваемого изделия с токоведущими частями. Изолирующие детали, расположенные в зоне крепления электрода, должны быть выполнены съемными и изготовлены из материала, стойкого к тепловому воздействию сварочной дуги. Рукоятка электрододержателя должна быть выполнена из электроизоляционного материала и испытана пробивным напряжением 1500 В частотой 50 Гц в течение 1 мин. Превышение температуры наружной поверхности рукоятки над температурой окружающего воздуха на участке, охватываемой рукой сварщика, при номинальном режиме работы электрододержателя не должна быть более 40°С. Не освобожденная от изоляции часть сварочного кабеля должна входить внутрь рукоятки электрододержателя на глубину, равную двум наружным диаметрам кабеля, но не менее чем на 30 мм.

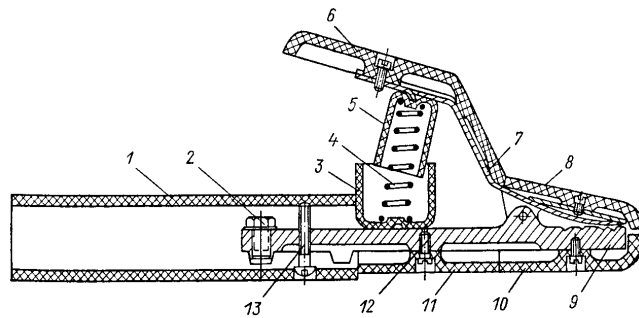


Рис. 4.12. Электрододержатель пассивного типа

В мировой практике применяются электрододержатели различных конструкций: пассажирного типа, защелочного типа, с рычажным зажимом и др. В СССР получили распространение электрододержатели ЭД пассажирного типа, выпускающиеся по ГОСТ 14651–78. Согласно стандарту электрододержатели выпускаются на номинальные токи 315 и 500 А при ПВ = 60%; тип электрододержателей соответственно ЭД-3102 и ЭД-5001.

На рис. 4.12 изображена конструкция электрододержателя пассажирного типа. Токоведущие части 2, 7, 9 защищены съемными изоляционными деталями 1, 6, 8, 10, 11, которые закреплены болтами 12 и др. Рукоятка электрододержателя съемная и закрепляется при помощи винта 13. Сварочный кабель подсоединяется к токоведущей части при помощи болта 2. Установка металлического электрода в электрододержатель и освобождение огарка электрода производятся при помощи рычажного механизма 3–6.



## ПРОМЫШЛЕННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И УСТАНОВКИ

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сварочные трансформаторы общего назначения серийно изготавливаются промышленностью для трех основных видов дуговой сварки переменным током: ручной дуговой сварки штучными электродами, автоматической сварки под флюсом и для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом алюминия и его сплавов. Трансформаторы для ручной дуговой сварки составляют подавляющее большинство всех сварочных трансформаторов, применяются практически во всех отраслях народного хозяйства и выпускаются в передвижном, переносном (облегченном) и бытовом исполнениях. Трансформаторы для автоматической сварки используются преимущественно в составе стационарных сварочных автоматов в машиностроении, строительстве и в трубосварочном производстве.

Трансформаторы для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом обычно конструктивно объединяются со вспомогательными устройствами: возбуждения и стабилизации дуги, подавления постоянной составляющей сварочного тока, управления циклом сварки и газовой аппаратурой. В комплекте со сварочными горелками, соединительными проводами и шлангами эти изделия содержат все необходимое для ручной или автоматической сварки неплавящимся электродом

и называются сварочными установками. Наиболее широко установки для сварки алюминиевых сплавов применяются в судо- и авиастроении.

### 5.2. ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

**Трансформаторы с механическим регулированием.** Трансформаторы выпускаются по ГОСТ 95–77. Все трансформаторы работают при естественной вентиляции и соответствуют степени защиты IP22. Длительность цикла сварки для трансформаторов принята 5 мин.

Трансформаторы выпускаются в переносном, передвижном и бытовом исполнениях. Переносные, или облегченные, трансформаторы предназначены для прихваточных и ремонтных работ, где продолжительность нагрузки (ПН) не превышает 20–25%. Передвижные трансформаторы предназначены для обычных условий работы с ПН = 60%. Напряжение холостого хода трансформаторов выше безопасного, поэтому при работе в особо опасных условиях трансформаторы должны комплектоваться устройствами снижения напряжения (УСНТ).

Внешние характеристики сварочных трансформаторов имеют крутопадающую рабочую часть со сравнительно небольшими кратностями тока короткого замыкания – примерно 1,2–1,3 значения сварочного тока при номинальном рабочем напряжении.

Трансформаторы снабжены емкостными фильтрами, предназначенными для снижения помех радиоприему, создаваемых трансформаторами при сварке. Каждый трансформатор перед упаковкой и отправкой потребителю подвергается приемо-сдаточным испытаниям. При этом проверяются основные параметры трансформатора, электрическая прочность и сопротивление изоляции, механическая прочность конструкции. В комплект поставок трансформатора входят маска и щиток сварщика, два электрододержателя (в том числе один с гибким проводом длиной 3 м), светофильтр марки Э4.

Некоторые типы передвижных и бытовых сварочных трансформаторов имеют косинусные конденсаторы, поскольку являются потребителями энергии с низким коэффициентом мощности. Для повышения коэффициента мощности трансформатора для ручной дуговой сварки, который обычно не отключается от сети при холостом ходе, параллельно его первичной обмотке подключают конденсатор соответствующей мощности. Средневзвешенный коэффициент мощности такого трансформатора, работающего при ПН = 60%, может быть определен по формуле

$$\cos \varphi_{\text{срв}} = \frac{P_{1\text{н}} \cdot 0,6 + P_0 \cdot 0,4}{\sqrt{(P_{1\text{н}} \cdot 0,6 + P_0 \cdot 0,4)^2 + [(Q_{1\text{х}} - Q_C) \cdot 0,6 + (Q_{1\text{х0}} - Q_C) \cdot 0,4]^2}},$$

где  $P_{1\text{н}}$ ,  $P_0$  – активная мощность трансформатора при нагрузке и холостом ходе;  $Q_{1\text{х}}$ ,  $Q_{1\text{х0}}$  – реактивная мощность при нагрузке и холостом ходе без конденсатора;  $Q_C$  – мощность конденсатора.

Например, коэффициент мощности трансформатора ТД-502 с конденсатором мощностью  $Q_C = 9,4$  квар составляет в номинальном режиме 0,86; средневзвешенный коэффициент мощности при работе с ПН = 60% равен 0,98. Те же величины при работе без конденсатора равны соответственно 0,71 и 0,7.

*Трансформаторы серии ТД.* Технические данные трансформаторов приведены в табл. 5.1. Трансформаторы на номинальные токи 160 и 250 А являются переносными, на токи 315 и 500 А — передвижными. Основные узлы каждого трансформатора — магнитопровод, первичные и вторичные обмотки, механизм регулирования тока, переключатель диапазонов тока, токоуказательный механизм, кожух. По принципу регулирования это трансформаторы с подвижными обмотками. Схема соединения катушек обмоток переносных трансформаторов приведена на рис. 2.6, в. Для получения диапазона больших токов катушки первичной обмотки соединяются последовательно, а катушки вторичной обмотки — параллельно; для получения диапазона малых токов одна катушка вторичной обмотки отключается. Схема соединения катушек обмоток передвижных трансформаторов показана на рис. 2.6, б. Параллельное соединение катушек обмоток соответствует диапазону больших токов, последовательное — диапазону малых токов. При последовательном соединении часть витков первичной обмотки отключается и напряжение холостого хода повышается. Это благоприятно отражается на стабильности горения дуги при сварке на малых токах. Переключение диапазонов тока в переносных трансформаторах осуществляется съемной перемычкой, а в передвижных — переключателем барабанного типа, рукоятка которого выведена на верхнюю крышку трансформатора.

На рис. 5.1 показан трансформатор ТД-300 без кожуха. Магнитопровод 1 стержневого типа, набран из пластин холоднокатаной стали марки 3412 толщиной 0,5 мм и стянут набором из десяти изолированных шпилек 3, проходящих сквозь отверстия в пластинах магнитопровода. Катушки первичной обмотки 2 неподвижно закреплены на нижнем ярме магнитопровода при помощи стяжек и изоляционных планок 4. Катушки 11 подвижной вторичной обмотки скреплены между собой изоляционной обоймой 12. Через верхнее ярмо магнитопровода пропущен ходовой винт, который ввинчивается в вмонтированную в обойму 12 ходовую гайку. При вращении ходового винта с помощью рукоятки 8

на рис. 5.1 показан трансформатор ТД-300 без кожуха. Магнитопровод 1 стержневого типа, набран из пластин холоднокатаной стали марки 3412 толщиной 0,5 мм и стянут набором из десяти изолированных шпилек 3, проходящих сквозь отверстия в пластинах магнитопровода. Катушки первичной обмотки 2 неподвижно закреплены на нижнем ярме магнитопровода при помощи стяжек и изоляционных планок 4. Катушки 11 подвижной вторичной обмотки скреплены между собой изоляционной обоймой 12. Через верхнее ярмо магнитопровода пропущен ходовой винт, который ввинчивается в вмонтированную в обойму 12 ходовую гайку. При вращении ходового винта с помощью рукоятки 8

Таблица 5.1

Параметры	ТД-102	ТД-306	ТД-300	ТД-500	ТД-502
Номинальный сварочный ток, А	160	250	315	500	
Номинальное рабочее напряжение, В	26,4	30	32,6	40	
Минимальный сварочный ток, А, не более	60	100	60	100	
Минимальное рабочее напряжение, В	22,4	24,0	22,4	24	
Максимальный сварочный ток, А, не менее	175	300	360	560	
Максимальное рабочее напряжение, В	27	32	34,4	42,4	
Номинальный режим работы, ПН, %	20		60		
Коэффициент полезного действия, %	72	78	86	88,5	
Коэффициент мощности	0,48	0,5	0,56	0,68	0,85
Напряжение холостого хода, В, не более	80			80	
Климатическое исполнение и категория размещения	У2			У2	
Класс изоляции	В, Н				
Габариты, мм:					
длина	570	630	692	720	765
ширина	325	370	620	670	
высота	530	585	710	835	
Масса, кг	38	67	135	180	210

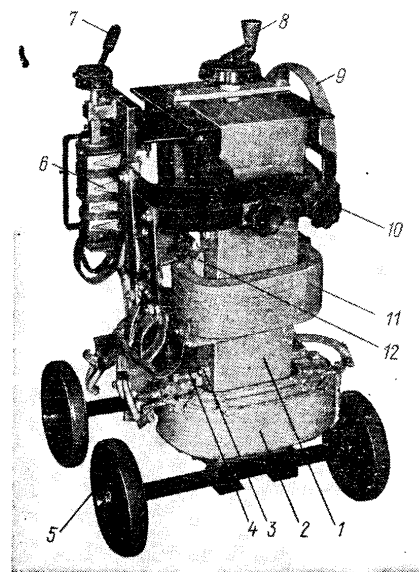


Рис. 5.1. Трансформатор ТД-300 без кожуха



Параметры	ТД-102			ТД-306	
	Первичная обмотка		Вторичная обмотка	Первичная обмотка	
	220 В	380 В		220 В	380 В
Число катушек	2,8 × 5,6		2	3,55 × 6,3	2,8 × 4,75
Размеры голого провода, мм	2,0 × 4,0		4,0 × 6,4		
Марка провода	АПСД				
Число параллельных проводов	1				
Число витков	9 сл. × 11 + 1 сл. × 6	14	5 сл. × 11 + 1 сл. × 10	8	10 сл. × 12 + 1 сл. × 7
Число слоев	10	13	6	9	11
Число витков в катушке	105	182	65	72	127
Ответвления	0-105	0-182	0-65	0-72	0-127
Соединение катушек	Последовательное		Параллельное	Последовательное	
Сопротивление катушек при 20 °С, Ом	0,17	0,54	0,15	0,1	0,31
Масса комплекта, кг	4,0	3,8	3,9	4,9	4,8

изменяется расстояние между обмотками и регулируется сварочный ток. Для снижения вибрации подвижной обмотки обойма 12 снабжена плоскими пружинами, которые при перемещении скользят по стержням магнитопровода. В крышке кожуха имеются отверстия для осей органов управления – рукоятки 7 переключателя диапазонов 6, рукоятки плавного регулирования тока 8, а также смотровое окно указателя значения сварочного тока. Указатель 9 секторного типа, закреплен на магнитопроводе под крышкой кожуха и связан с подвижной обмоткой рычажной передачей. Шкала градуирована в амперах для двух диапазонов тока при номинальном напряжении питающей сети и при напряжении  $U_2 = 20 + 0,04 I_2$  (в вольтах) на выходных зажимах вторичной цепи. Точность показаний шкалы может находиться в пределах  $\pm 7,5\%$  от значения максимального тока, указанного на шкале, и в реальных условиях зависит от напряжения сети и длины дуги. На концах шкалы имеются надписи "Стоп", предупреждающие о конце хода подвижной обмотки. Для удобства перемещения передвижные трансформаторы имеют четыре колеса 5 и ручки, а для подъема – скобы, расположенные на крышке кожуха. Кожух трансформатора крепится болтами к осям колес, оси приварены к нижним стягивающим уголкам магнитопровода. Для подключения сетевых и сварочных проводов имеются доски зажимов, закрепленные с двух сторон на магнитопроводе. Доски зажимов

Таблица 5.2

Вторичная обмотка	ТД-300			ТД-500		
	Первичная обмотка		Вторичная обмотка	Первичная обмотка		Вторичная обмотка
	220 В	380 В		220 В	380 В	
4,0 × 10	3,75 × 6,0	2,8 × 4,75	2	5,6 × 8,0	4,0 × 6,3	4,7 × 25
АПСД			АДО 1	АПСД		АДО
7	8 сл. × 12 + 1 сл. × 11	11 сл. × 16 + 1 сл. × 11	30	4 сл. × 12 + 2 сл. × 10 + 1 сл. × 4	3 сл. × 14 + 5 сл. × 15 + 1 сл. × 9	20
6	9	12	1	7	9	1
42	107	187	30	72	126	20
0-42	0-84-107	0-144-187	0-30	0-58-72	0-102-126	0-20
Параллельное 0,0077	Последовательное и параллельное					
	0,41	0,13	0,003	0,082	0,054	0,00153
4,9	8,1	8,2	6,5	13,3	13,6	7,8

закрываются защитными крышками. Сварочные провода крепятся пластмассовыми маховичками 10.

Трансформаторы, предназначенные для народного хозяйства, выпускаются на напряжение сети 220 и 380 В и имеют алюминиевые обмотки. В переносных трансформаторах обмотки выполнены проводом АПСД, в передвижных трансформаторах первичные обмотки – проводом АПСД, вторичные – голой шиной марки АДО "на ребро", с последующей изоляцией витков катушек стеклотентой. Обмоточные данные трансформаторов серии ТД приведены в табл. 5.2.

**Трансформаторы серии ТДМ.** В настоящее время трансформаторы ТД сняты с производства и заменены трансформаторами новой серии ТДМ. По схемным решениям и техническим данным трансформаторы серии ТДМ близки к своим предшественникам, однако применение новых материалов, современных технологических решений, а также введение в серию трансформатора на номинальный ток 400 А позволили получить значительный народнохозяйственный эффект. Технические данные трансформаторов серии ТДМ приведены в табл. 5.3. Применение бесшпильной конструкции магнитопровода, термостойкой пластмассы и кремнийорганической пропитки катушек повысило надежность работы трансформаторов, увеличило их срок службы.

Таблица 5.3

Параметры	ТДМ-317	ТДМ-401	ТДМ-503	ТДМ-317-1	ТДМ-401-1	ТДМ-503-1	ТДМ-503-2	ТДМ-503-3	ТДМ-165	ТДМ-254
	Номинальный сварочный ток, А	315	400	500	315	400	500	500	160	250
Номинальное рабочее напряжение, В	33	36	40	33	36	40	40	26	30	30
Минимальный сварочный ток, А, не более	60	80	90	60	80	90	90	55	85	85
Минимальное рабочее напряжение, В	23	23	24	23	23	24	24	22	23	23
Максимальный сварочный ток, А, не менее	370	460	560	360	460	560	560	170	250	250
Максимальное рабочее напряжение, В	34	38	42	34	38	42	42	27	30	30
Номинальный режим работы, ПН, %	86	86	88	86	86	86	86	68	76	76
Коэффициент полезного действия, %	0,56	0,6	0,65	0,56	0,6	0,65	0,85	0,54	0,56	0,56
Коэффициент мощности	80	80	80	12	12	80	80	12	62	62
Напряжение холостого хода, В, не более										
Климатическое исполнение и категория размещения	У2	У2	У2	У2	У2	У2	У2	У2	У2	У2
Класс изоляции	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Габариты, мм:										
длина	818	555	888	818	760	888	660	440	440	440
ширина	130	848	170	145	585	170	888	282	282	282
высота		145	170	145	160	185	195	210	502	502
Масса, кг								37	50	50

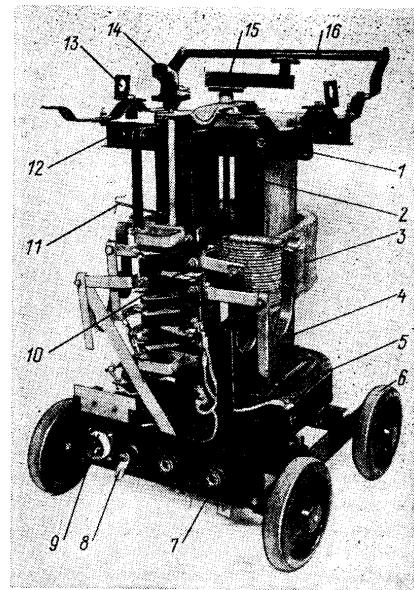


Рис. 5.2. Трансформатор ТДМ-503 без кожуха

На рис. 5.2 представлен внешний вид трансформатора ТДМ-503 без кожуха. Магнитопровод 4 набран из пластин холоднокатаной стали марки 3414 толщиной 0,35 мм и стянут набором из горизонтальных 12 и вертикальных 2 швеллеров, скрепленных по углам магнитопровода замковыми соединениями и четырьмя шпильками 1, которые проходят вне магнитопровода. На основании магнитопровода установлены два штыревых разъема 7 для присоединения сварочных проводов, болт заземления 8 и сетевой штепсельный разъем 9. На боковой поверхности кожуха сделана прорезь токоуказателя с нанесенной рядом шкалой сварочного тока. Токоуказатель выполнен в виде стрелки 11, жестко связанной с обмоткой вторичной подвижной обмотки 3. Первичные обмотки 5 закреплены на нижнем яре магнитопровода. Переключатель диапазонов тока 10 ножевого типа, управляется рукояткой 14. Сварочный ток в пределах каждого диапазона регулируется вращением рукоятки 15. Для перемещения трансформатора предусмотрены колеса 6, ручка 16 и рым-болты 13.

Наряду с базовыми моделями ТДМ-317, ТДМ-401 и ТДМ-503 выпускаются и их модификации. Для проведения сварки в особо опасных условиях (на открытом воздухе, внутри металлических емкостей,

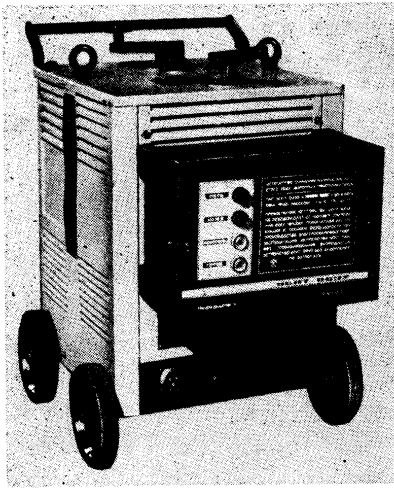


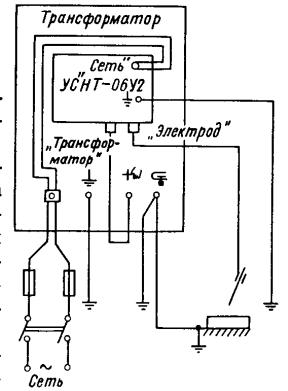
Рис. 5.3. Трансформатор ТДМ-317-1 с ограничителем напряжения УСНТ-06

в колодцах, туннелях и т. п.) предназначены трансформаторы ТДМ-317-1 (рис. 5.3), ТДМ-401-1 и ТДМ-503-1, которые снабжены устройством УСНТ-06, снижающим напряжение холостого хода на выходных зажимах трансформатора до значения, не превышающего 12 В, за время не более 1 с после обрыва дуги. Таким образом обеспечивается безопасность сварщика во время смены электродов. Схема присоединения УСНТ-06 к трансформатору серии ТДМ приведена на рис. 5.4. Трансформатор ТДМ-503-2 оснащен косинусным конденсатором, трансформатор ТДМ-503-3 — устройством УСНТ-06 и косинусным конденсатором, а трансформатор ТДМ-503-4 поставляется потребителю в комплекте с возбудителем-стабилизатором горения дуги ВСД-01. Обмоточные данные трансформаторов приведены в табл. 5.4.

Переносные трансформаторы серии ТДМ выполнены на витых разрезных ленточных магнитопроводах с обмотками класса нагревостойкости Н. Трансформаторы имеют меньшую массу, меньшие потери холостого хода и более высокую продолжительность нагрузки (ПН = 25%), чем их предшественники. Технические данные трансформаторов приведены в табл. 5.3.

Бытовые переносные сварочные трансформаторы АДЗ-50 и ТСБ-90-1 выпускаются для использования в гаражах и личных хозяйствах. Трансформаторы включаются в бытовую осветительную сеть напряжением 220 В и позволяют сваривать конструкции из сталей небольших толщин электродами марки "Огонек", АНО-21, ОЗС-6 и другими диаметром

Рис. 5.4. Подключение ограничителя напряжения УСНТ-06 к сварочному трансформатору



до 3 мм. Трансформаторы имеют устройство для заряда аккумуляторов напряжением 6 и 12 В.

Принципиальная схема трансформатора АДЗ-50 приведена на рис. 5.5. На одном стержне магнитопровода трансформатора  $T$  расположены первичная обмотка  $W1$  и дополнительная вторичная обмотка  $W2д$ , на другом стержне — основная вторичная обмотка  $W2о$ . Сварочный ток регулируется ступенчато переключателем  $S2$ . Минимальный сварочный ток соответствует полностью включенной основной вторичной обмотке

(положение III переключателя  $S2$ ); во II и I положениях переключателя часть витков обмотки  $W2о$  заменяется витками обмотки  $W2д$ , имеющей жесткую магнитную связь с первичной обмоткой трансформатора. Отпайки обмотки  $W2д$  и переключатель  $S1$  обеспечивают ступенчатое (три ступени) регулирование тока заряда аккумуляторов в режиме 6 и 12 В. Ток заряда выпрямляется мостом  $VD$  и контролируется амперметром. Для уменьшения потребляемого из сети тока в трансформаторе установлена батарея косинусных конденсаторов  $C3$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  предназначены для снижения уровня помех радиоприему, создаваемых работой сварочного трансформатора. Вилка сетевого провода и розетка для включения трансформатора в сеть должны иметь заземляющий контакт, необходимый для надежного заземления свариваемого изделия.

Бытовой сварочный трансформатор ТСБ-90-1 отличается оригинальной схемой компенсации реактивной мощности: косинусный конденсатор  $C1$  (рис. 5.6) включен последовательно с первичной обмоткой трансформатора  $T1$  и создает в процессе сварки режим, близкий к резонансу напряжений, вдвое повышая напряжение на первичной обмотке трансформатора. На холостом ходу конденсатор  $C1$  закорачивается симистором  $VS$  и напряжение холостого хода трансформатора падает до безопасного значения 36 В. Симистор включается размыкающим контактом реле  $K$ , обмотка которого получает питание от вторичной обмотки трансформатора тока  $TT$ . Включение трансформатора в сеть, выбор режима работы (сварка, заряд аккумуляторов на номинальное напряжение 6 или 12 В) производится переключателем  $S1$ . Сварочный трансформатор  $T1$  стержневого типа, основная часть первичной обмотки  $W1о$  с отпайками для регулирования сварочного тока расположена на одном стержне, вторичная обмотка  $W2$  с отпайками для питания зарядного устройства и дополнительная первичная обмотка  $W1д$  —

$\frac{1}{2} 4^*$

Таблица 5.4

Параметры	ТДМ-317		ТДМ-401		ТДМ-503	
	Первичная обмотка	Вторичная обмотка	Первичная обмотка	Вторичная обмотка	Первичная обмотка	Вторичная обмотка
	220 В	380 В	220 В	380 В	220 В	380 В
Число катушек	3,15 × 5,6	3,0 × 25	4,0 × 6,3	3,8 × 25	4,75 × 7,1	4,7 × 25
Размеры голого провода, мм	2,24 × 4,5	3,0 × 25	2,8 × 5,3	2,8 × 5,3	3,35 × 5,6	4,7 × 25
Марка провода	АПСД	АДО	АПСД	АДО	АПСД	АДО
Число параллельных проводов	1	1	1	1	1	1
Число витков в слое	3 сл. × 10 + 12 сл. × 15 + 6 сл. × 11 + 1 сл. × 7	31	7 сл. × 12 + 1 сл. × 6	26	4 сл. × 10 + 9 сл. × 13 + 3 сл. × 11 + 1 сл. × 11	22
Число слоев	10	1	8	1	7	10
Число витков в катушке	107	31	90	26	73	128
Ответвления	0-85-107	0-150-187	0-72-90	0-126-154	0-62-73	0-104-128
Соединение катушек	Параллельное и последовательное					
Сопротивление катушек при 20 °С, Ом	0,054	0,003	0,032	0,094	0,022	0,068
Масса комплекта, кг	6,3	6,5	7,4	7,8	8,7	8,8
						8,1

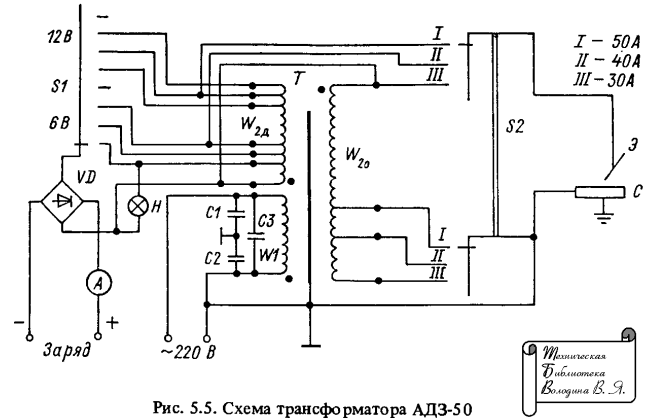


Рис. 5.5. Схема трансформатора АДЗ-50

на другом. Режим сварки устанавливается переключателем  $S2$ , ток заряда аккумулятора можно плавно регулировать резистором  $R4$ . Резисторы  $R2$  и  $R3$  ограничивают ток управления и анодный ток симистора, конденсаторы  $C2$ ,  $C3$  и  $C4$  предназначены для снижения уровня радиопомех. Технические данные трансформаторов приведены в табл. 5.5.

Трансформаторы с электрическим регулированием. Передвижной тиристорный трансформатор  $ТДЭ-402$  предназначен для ручной дуговой сварки, резки и наплавки металлов специальными электродами с железным порошком в обмазке, а также электродами общего применения. Технические данные трансформатора приведены в табл. 5.6. Трансфор-

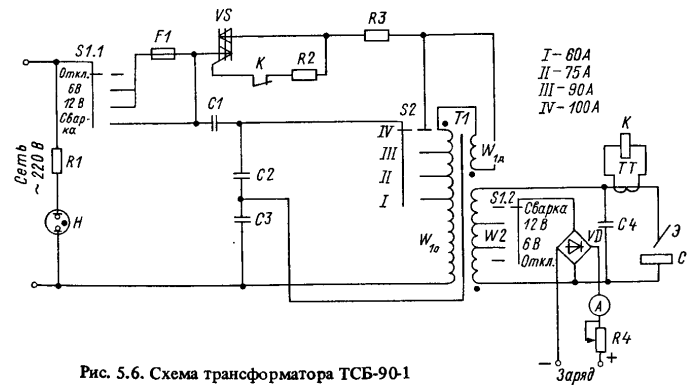


Рис. 5.6. Схема трансформатора ТСБ-90-1

Таблица 5.5

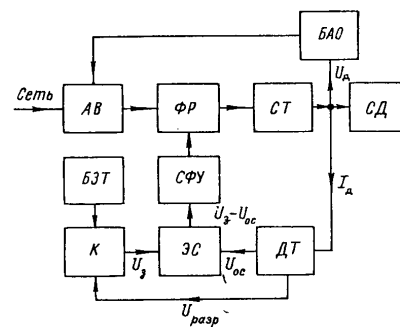
Параметры	АДЗ-50	ТСБ-90-1
Номинальное напряжение сети, В	220	220
Первичный ток, А	9	15
Номинальный сварочный ток, А	50	90
Ступени сварочного тока, А	30, 40, 50	60, 75, 90, 100
Режим работы, ПН, %	20	20
Пределы регулирования зарядного тока, А, в диапазоне:		
"6 В"	1-3	0,7-3
"12 В"	2-6	1,5-6
Масса, кг	25	30
Габариты, мм:		
длина	506	380
ширина	205	180
высота	360	140

мотор питает дугу прерывистым током, импульсная стабилизация дуги выполнена по схеме, приведенной ранее на рис. 3.5, е. Трансформатор имеет два диапазона регулирования сварочного тока; в пределах диапазона ток плавно регулируется с пульта дистанционного управления. На рис. 5.7 приведена структурная схема трансформатора ТДЭ-402. Тиристорный фазорегулятор  $\Phi P$  включен в цепь первичной обмотки

Таблица 5.6

Параметры	ТДЭ-402	ТДЭ-101	ТДЭ-251
Номинальный сварочный ток, А	400	100	250
Номинальное рабочее напряжение, В	44	24	30
Минимальный сварочный ток, А	80	40	90
Минимальное рабочее напряжение, В	25	22	24
Максимальный сварочный ток, А	430	110	260
Максимальное рабочее напряжение, В	46	24	30
Номинальный режим работы, ПН, %	60	20	20
Коэффициент полезного действия, %	86	60	65
Коэффициент мощности	0,61	0,9	0,8
Напряжение холостого хода, В:			
с ограничителем холостого хода	12	-	-
без ограничителя холостого хода	-	42	50
Климатическое исполнение и категория размещения	У3	У2	У2
Класс изоляции		Н	
Габариты, мм:			
длина	590	340	400
ширина	595	180	280
высота	820	450	540
Масса, кг	180	25	45

Рис. 5.7. Структурная схема трансформатора ТДЭ-402



силового трансформатора  $СТ$  и выполняет функции регулятора тока и устройства снижения напряжения холостого хода. Ключевой элемент  $К$  пропускает сигнал задания  $U_z$  с блока задания тока  $БЗТ$  на элемент сравнения  $ЭС$  только при наличии разрешающего сигнала  $U_{разр}$  с датчика

обратной связи  $ДТ$  по току сварочной дуги  $СД$ . В рабочем режиме трансформатора ключ  $К$  закрыт, разность сигналов задания и обратной связи по току дуги поступает на вход системы фазового управления  $СФУ$  и определяет значение угла включения тиристоров  $\varphi$  и ток вторичной обмотки силового трансформатора. Через 1 с после обрыва дуги ключ  $К$  открывается, на выходных зажимах трансформатора устанавливается напряжение холостого хода, не превышающее 12 В. В течение указанной выдержки времени на вход системы  $СФУ$  подан сигнал задания без вычета  $U_{о.с.}$ , что обеспечивает полное открытие тиристоров фазорегулятора и легкое повторное возбуждение дуги.

В аварийном режиме, например в случае пробоя одного из тиристоров, на выходных зажимах трансформатора появляется полное напряжение холостого хода  $U_{20} = 80$  В. Если время наличия этого напряжения более 1 с, то блок аварийного отключения  $БАО$  подает команду на независимый расцепитель автоматического выключателя  $АВ$  и трансформатор отключается от сети.

Фазорегулятор выполнен на тиристорах ТЛ-200; управление тиристорами производится собственным анодным напряжением по схеме, приведенной на рис. 3.13, в. Тиристоры работают при естественном охлаждении.

Внешние характеристики трансформатора ТДЭ-402 представлены на рис. 5.8.

Переносные тиристорные трансформаторы  $ТДЭ-101$  и  $ТДЭ-251$  предназначены для строительно-монтажных, сантехнических, ремонтных и других работ, производимых в помещениях или под навесом при температуре от  $-45$  до  $+40$  °С. Трансформаторы выполнены с цепью подпитки по схеме рис. 3.5, г; функции вспомогательного трансформатора цепи подпитки выполняет обмотка, расположенная на дополнительном (третьем) яре магнитопровода. Фазосдвигающее и выходное устройства фазорегулятора аналогичны представленным на рис. 3.13, а, б; вместо транзистора  $VT2$  использован резистор с переменным сопротивлением. Технические данные трансформаторов приведены в табл. 5.6.

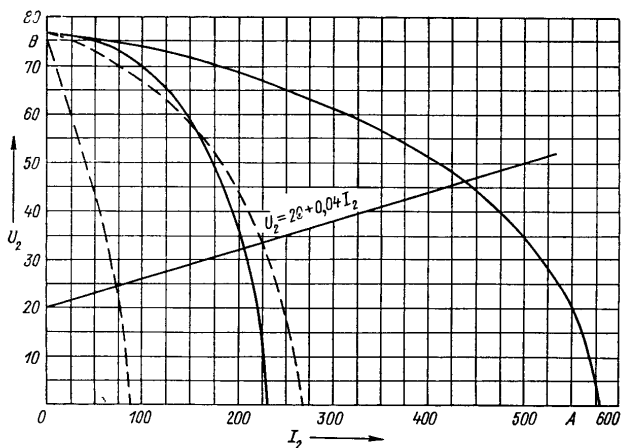


Рис. 5.8. Внешние характеристики трансформатора ТДЗ-402

Трансформаторы с импульсной стабилизацией горения дуги. Импульсная стабилизация горения дуги переменного тока позволяет существенно повысить устойчивость сварочной дуги, использовать для сварки электроды как переменного, так и постоянного тока (УОНИ, ОЗЛЖ-8), увеличить производительность и эффективность сварочных работ.

Промышленность выпускает трансформаторы ТДМ-503 в комплекте с возбудителем-стабилизатором дуги ВСД-01 (общее обозначение ТДМ-503-4) и переносные источники питания "Разряд-250", в которых сварочный трансформатор и стабилизатор схемно и конструктивно объединены [13]. Конструкция и технические данные трансформаторов ТДМ-503 и стабилизаторов ВСД-01 достаточно полно рассмотрены в предыдущих параграфах.

Упрощенная схема источника питания "Разряд-250" приведена на рис. 5.9. Источник состоит из сварочного трансформатора  $T1$ , цепи импульсной стабилизации (обмотки питания 2, 3 и 4, накопительный конденсатор  $C1$  и коммутатор, выполненный на тиристорах  $VS1$  и  $VS2$ ) и схемы управления тиристорами коммутатора. Трансформатор  $T1$  собран на витом магнитопроводе; в пространстве между первичной 1 и вторичной 2 обмотками расположены реакторные воздушные катушки 6-11, которые включаются переключателем диапазонов сварочного тока  $S1$  последовательно с первичной обмоткой. В поле рассеяния между обмотками 1 и 2 установлена и обмотка 5 питания схемы управления стабилизатора, что обеспечивает автоматическое прекращение работы стабилизатора после окончания сварки. Обмотка 3 питания стабили-

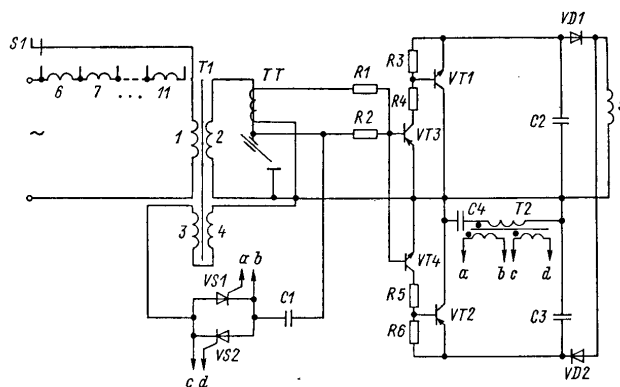


Рис. 5.9. Упрощенная схема источника питания "Разряд-250"

затора жестко связана с первичной, а обмотка 4 — со вторичной обмоткой сварочного трансформатора. Такое исполнение цепи питания стабилизатора обеспечивает ограничение скорости заряда и разряда конденсатора  $C1$ , что необходимо для надежной работы тиристорного коммутатора. Управление коммутатором стабилизатора двойное: по току вторичной обмотки трансформатора тока  $TT$  и по напряжению на сварочных электродах. При замкнутом сварочном контуре  $TT$ , работающий в режиме пик-трансформатора (сопротивление  $R1$  достаточно велико), генерирует импульсы тока в моменты перехода тока на нагрузку через нулевое значение. В зависимости от полярности импульсов открываются транзисторы  $VT3$ ,  $VT1$  или  $VT4$ ,  $VT2$ , конденсатор  $C2$  или  $C3$  подключается через времяограничивающий конденсатор  $C4$  к первичной обмотке импульсного трансформатора  $T2$ , вызывая включение одного из тиристоров коммутатора. При случайном обрыве дуги нарастающее напряжение на электродах через резистор  $R2$  включает соответствующий полярности этого напряжения тиристорный ключ. Сопротивление резистора  $R2$  выбрано так, что транзисторы  $VT3 - VT1$  ( $VT4 - VT2$ ) включаются при напряжении на электродах, близком к амплитудному значению напряжения холостого хода трансформатора  $T1$ . Таким образом, при смене полярности сварочного тока, т.е. с частотой 100 Гц, и каждый раз при случайном обрыве дуги на электроды налагается стабилизирующий разряд конденсатора  $C1$ .

Ступенчатое регулирование сварочного тока производится переключателем  $S1$ , плавное регулирование в пределах одной ступени — путем намотки сварочного кабеля на кожух источника питания (до 5 витков). Охлаждение — воздушное, естественное.

Технические данные источника "Разряд-250" приведены ниже:

Напряжение питающей сети, В . . . . .	380
Номинальная потребляемая мощность, кВт·А . . . . .	15
Напряжение холостого хода, В . . . . .	60
Номинальный сварочный ток, А . . . . .	250
Пределы регулирования сварочного тока, А . . . . .	90–250
Номинальный режим работы, ПН, % . . . . .	20
Масса, кг, не более . . . . .	50

### 5.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Трансформаторы выпускаются в стационарном исполнении, рассчитаны на продолжительный режим работы при принудительном воздушном охлаждении. Технические данные трансформаторов приведены в табл. 5.7.

Трансформаторы серии ТДФ. В основу конструкции положен трансформатор с магнитным шунтом, подмагничиваемым постоянным током. На рис. 5.10 приведена упрощенная электрическая схема трансформатора ТДФ-1001.

На каждом стержне главного магнитопровода трансформатора *T1* расположены катушки первичной *W1* и вторичной обмоток. Вторичная обмотка состоит из двух частей: основной части *W20*, расположенной у верхнего яра главного магнитопровода, и дополнительной части *W2д*,

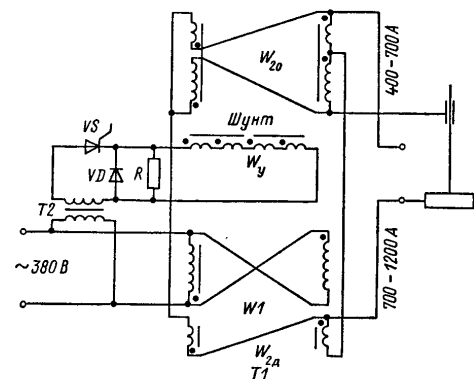


Рис. 5.10. Упрощенная схема трансформатора ТДФ-1001

расположенной вместе с первичной обмоткой у нижнего яра главного магнитопровода. Магнитный шунт с обмоткой управления *Wy* размещен в окне главного магнитопровода между обмотками *W20* и *W1* на пути основного потока рассеяния трансформатора. Трансформаторы имеют шпално-ступенчатое регулирование сварочного тока.

Ступенчатое регулирование (две ступени) осуществляется переключением витков катушек вторичной обмотки. При переходе со ступени меньших токов на ступень больших токов часть витков основной вторичной обмотки отключается и подключается дополнительная часть вторичной обмотки, индуктивное сопротивление трансформатора при этом снижается. Плавное регулирование тока в пределах одной ступени производится подмагничиванием магнитного шунта. Большему току управления соответствует больший сварочный ток.

Обмотка управления магнитного шунта питается от однофазного тиристорного выпрямителя, состоящего из вспомогательного трансформатора *T2*, тиристора *VS*, обратного диода *VD* и схемы фазового управления тиристором, выполненной на логическом элементе М-403 (на рис. 5.10 не показана).

Сварочные трансформаторы ТДФ оборудованы пускорегулирующей и защитной аппаратурой. Предусмотрена возможность местного и дистанционного (с пульта управления сварочного автомата) включения и регулирования сварочного тока. Трансформаторы имеют падающие внешние характеристики. При таких характеристиках получается хорошее формирование шва при работе со сварочными автоматами, снабженными системой автоматического поддержания заданного напряжения дуги (автоматы с зависимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки).

Таблица 5.7

Параметры	ТДФ-1001УЗ	ТДФ-1601УЗ	ТДФЖ-1002УЗ	ТДФЖ-2002УЗ
Номинальный сварочный ток, А	1000	1600	1000	2000
Номинальное рабочее напряжение, В	44	60	56	76
Номинальный режим работы, ПВ, %			100	
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	36–44	34–60	30–56	32–76
Пределы регулирования сварочного тока, А	400–1200	600–1800	300–1200	600–2200
Коэффициент полезного действия, %, не менее	87	88	86	88
Класс изоляции катушек	В		Н	
Масса, кг, не более	720	1000	550	850
Удельная материалоемкость, кг/кВт	17,1	10,4	9,8	5,6

Между тем в отечественной промышленности в последние годы получили большое распространение более простые и надежные автоматы и автоматические головки с независимой от напряжения дуги скоростью подачи проволоки.

Сварочные трансформаторы ТДФ-1001 и ТДФ-1601 и другие трансформаторы с падающими характеристиками в составе автоматов такого рода не позволяют в ряде режимов сварки получить достаточную стабильность параметров сварного шва. Недостаточная выходная мощность трансформаторов этой серии сдерживала внедрение в производство прогрессивных и форсированных режимов, особенно при многодуговой сварке труб большого диаметра. Выпуск трансформаторов ТДФ прекращен в 1980 г.

Трансформаторы серии ТДФЖ. Номинальные параметры трансформаторов ТДФЖ соответствуют требованиям ГОСТ 7012-77 на трансформаторы для автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы этой серии имеют тиристорное регулирование и обеспечивают импульсную стабилизацию процесса сварки [21].

Силовой трансформатор выполнен по схеме, приведенной на рис. 3.11. Магнитопровод трансформатора наборный, бесшпильчатой конструкции, изготовлен из стали марки 3414 толщиной 0,35 мм. Обмотки выполнены шиной, намотанной "на ребро". В трансформаторе ТДФЖ-1002 применена алюминиевая шина марки АДО, в ТДФЖ-2002 — медная шина марки МГМ.

Упрощенная принципиальная электрическая схема трансформатора ТДФЖ-1002 приведена на рис. 5.11, внешний вид трансформатора — на рис. 5.12.

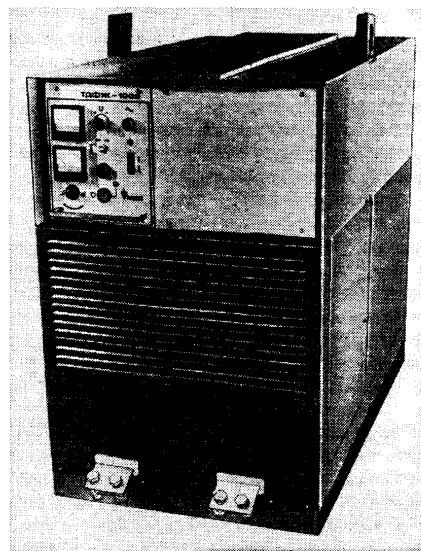


Рис. 5.12. Трансформатор ТДФЖ-1002

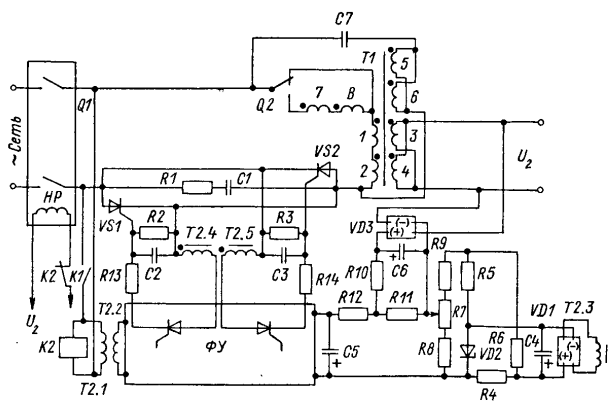


Рис. 5.11. Упрощенная схема трансформатора ТДФЖ-1002

Первичные 1, 2 и вторичные 3, 4 обмотки силового трансформатора Т1 состоят каждая из двух катушек, разделенных для удобства на две последовательно соединенные секции. Между секциями катушек вторичной обмотки установлены обмотки импульсной стабилизации 5, 6. В окне трансформатора размещены две катушки реакторной обмотки 7, 8, позволяющей производить ступенчатое регулирование тока. В трансформаторе ТДФЖ-1002 полный диапазон регулирования разбит на две, а в ТДФЖ-2002 — на три ступени; третья ступень регулирования в трансформаторах ТДФЖ-2002 обеспечивает возможность сварки при больших (до 40 В) падениях напряжения в сварочных проводах.

В трансформаторе ТДФЖ-1002 для сварки в диапазоне малых токов катушки реакторной обмотки включены последовательно и согласно по отношению к первичной обмотке; в трансформаторе ТДФЖ-2002 катушки реакторной обмотки включены последовательно для сварки в диапазоне малых токов и параллельно — в диапазоне средних токов. При сварке в диапазоне больших токов реакторные обмотки не включаются.

Тиристорами VS1 и VS2 регулируется напряжение на первичной обмотке силового трансформатора Т1. Защита силовых тиристоров VS1 и VS2 от коммутационных перенапряжений производится RC-цепями



( $C1$  и  $R1$ ). Защита управляющих переходов тиристоров от случайных сигналов осуществляется резисторами  $R2$  и  $R3$  и конденсаторами  $C2$  и  $C3$ . Импульсы управления поступают на тиристоры с фазосдвигающего устройства (ФУ), на вход которого подана разность сигналов задания рабочего напряжения и обратной связи.

Цепь задания рабочего напряжения питается от обмотки  $T2.3$  вспомогательного трансформатора  $T2$ . После выпрямления диодным мостом  $VD1$  и сглаживания конденсатором  $C4$  напряжение подается через резистор  $R4$  на стабилитрон  $VD2$ . Для параметрической стабилизации рабочего напряжения трансформатора используют делитель из резисторов  $R5$  и  $R6$ . На потенциометр задания рабочего напряжения  $R7$  подается разность стабилизированного напряжения на стабилитроне  $VD2$  и нестабилизированного напряжения на резисторе  $R5$ . Таким образом, при росте сетевого напряжения сигнал задания на потенциометре  $R7$  уменьшается, а при уменьшении сетевого напряжения — увеличивается. Резисторы  $R8$  и  $R9$  служат для установления минимального и максимального значений рабочего напряжения трансформатора.

Напряжение задания с потенциометра  $R7$  сравнивается с сигналом обратной связи по рабочему напряжению. Цепь обратной связи состоит из выпрямительного моста  $VD3$ , резисторов делителя напряжения обратной связи  $R10$  и  $R11$  и сглаживающего конденсатора  $C6$ . В полностью сформированном виде напряжение обратной связи выделяется на резисторе  $R11$ .

Разность между напряжениями задания и обратной связи через фильтр (резистор  $R12$ , конденсатор  $C5$ ) подается на вход ФУ, принцип действия которого подробно рассмотрен в главе третьей (см. § 3.5).

Уменьшение напряжения на выходных зажимах трансформатора в результате воздействия какого-либо возмущения процесса (например, уменьшение вылета электрода) вызывает уменьшение сигнала обратной связи. Поскольку напряжение задания не изменилось, возрастает разностный сигнал на входе ФУ. Заряд времязадающего конденсатора ФУ ускоряется, уменьшается время от начала полупериода напряжения питающей сети до момента разряда конденсатора и поступления импульсов управления на силовые тиристоры. В результате напряжение на обмотках силового трансформатора возрастает до прежнего значения.

Трансформатор включается на сварку выключателем  $K1$ . При этом подается питающее напряжение на ФУ, на узел задания рабочего напряжения (обмотка  $T2.3$ ) и на выходное устройство ФУ (обмотки  $T2.4$  и  $T2.5$ ). На выходных зажимах силового трансформатора устанавливается напряжение холостого хода, соответствующее уставке потенциометра  $R7$ .

В случае пробоя силовых тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  при отсутствии сварки на вторичной обмотке трансформатора появится полное напряжение холостого хода. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала предусмотрена автоматическая защита. С этой целью выводы независимого расцепителя  $HP$  автоматического выключателя  $Q1$ , установленного на входе трансформатора, через размыкающий контакт

магнитного пускателя  $K2$  подключены на выходные зажимы трансформатора, что обеспечивает практически мгновенное отключение его от сети при появлении напряжения холостого хода в процессе настроечных работ.

На рис. 5.13 приведены внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002 для диапазонов больших и малых токов; штриховыми линиями обозначены предельные естественные внешние характеристики силового трансформатора для этих диапазонов. Жесткость внешних характеристик обеспечивает поддержание постоянного напряжения дуги. Значение сварочного тока определяется скоростью подачи электродной проволоки. Параллельность внешних характеристик трансформаторов ТДФЖ позволяет ориентировочно установить рабочее напряжение на холостом ходу трансформатора. При замыкании электродной проволоки на изделие в момент зажигания дуги напряжение на выходе трансформатора резко падает, тиристоры фазорегулятора полностью открываются. Это означает, что независимо от режима сварки зажигание дуги всегда происходит на максимальном токе установленного диапазона.

На рис. 5.14 показаны записанные самописцем ток и напряжение первой дуги трехдугового стана для сварки труб большого диаметра при питании дуги от трансформатора ТДФЖ-2002 (рис. 5.14, а) и ТДФ-1601 (рис. 5.14, б). При сварке от трансформатора ТДФЖ-2002 с жесткими внешними характеристиками процесс саморегулирования дуги протекает более активно: постоянство длины дуги обеспечивается непрерывными колебаниями сварочного тока.

В некоторых случаях автоматической сварки, например при сварке под флюсом с зависимой от напряжения дуги скоростью подачи электрода, сварочный трансформатор должен иметь крутопадающие внешние характеристики. В тран-

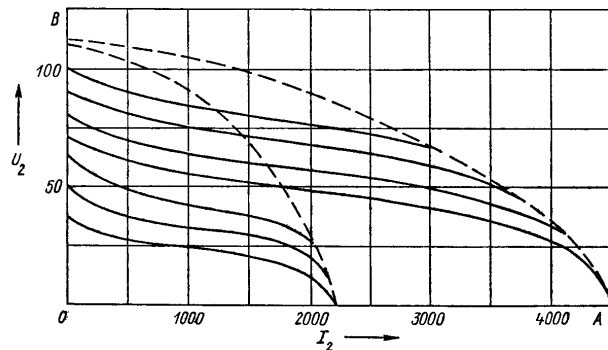


Рис. 5.13. Внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002

Малыгина  
Библиотека  
Володина В. Я.

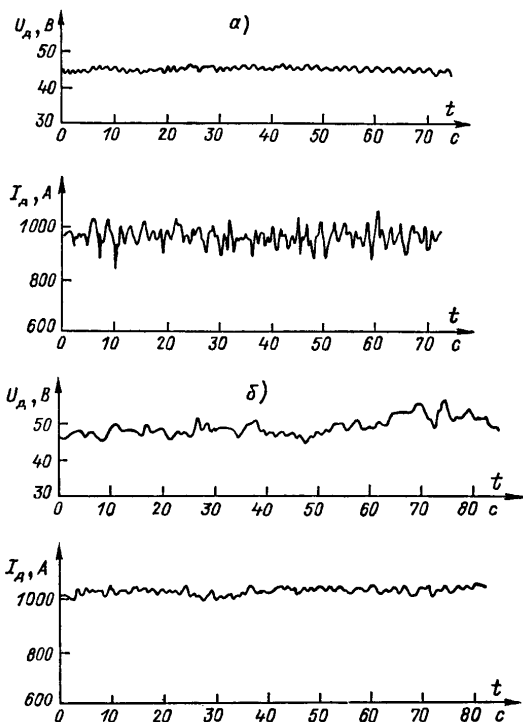


Рис. 5.14. Ток и напряжение дуги при сварке под флюсом от трансформаторов ТДФЖ-2002 (а) и ТДФ-1601 (б) в режиме 1000 А, 45 В

форматорах серии ТДФЖ такие характеристики могут быть получены путем относительно несложной переделки схемы управления. Переделка сводится к замене отрицательной обратной связи по напряжению нагрузки обратной связью по току.

В главе третьей отмечалось, что в ТТ с воздушной реакторной обмоткой в окне силового трансформатора сигнал обратной связи по току может быть снят непосредственно с реакторной обмотки, ЭДС которой пропорциональна сварочному току. Для гальванической развязки элементов управления от питающей сети следует использовать разделительный трансформатор, первичная обмотка которого подключается к любой из двух катушек реакторной обмотки, а вторичная — на входные выводы выпрямительного моста цепи обратной связи (мост *VD3* на схеме рис. 5.11). Поскольку кратность регулирования сварочного тока выше кратности регулирования напряжения, для формирования линейной шкалы управления током необходимо заново подобрать сопротивления резисторов в цепи

задающего потенциометра (резисторы *R8* и *R9* на рис. 5.11). В случаях, когда должна быть обеспечена возможность сварки как на жестких, так и на падающих характеристиках, в различных диапазонах сварочного тока и с качественной стабилизацией по напряжению питающей сети, очевидна необходимость применения переключателя вида внешних характеристик.

Ниже приведены принципиальные схемы, типы и параметры комплектующих изделий, необходимых для переделки трансформатора ТДФЖ-2002 в универсальный трансформатор с тремя диапазонами регулирования сварочного тока в режиме сварки с независимой скоростью подачи электрода и с двумя диапазонами регулирования сварочного тока в режиме сварки с зависимой скоростью подачи электрода. На рис. 5.15, а показана схема включения разделительного трансформатора *T1* обратной связи по сварочному току. Первичная обмотка трансформатора подключена к катушке реакторной обмотки, провода *A1* и *9* — по принципиальной схеме трансформатора (паспорт ИЕГВ.672.222.022.00ПС). Развязывающий трансформатор изготовлен на магнитопроводе Ш16 × 16, первичная и вторичная обмотки содержат по 700 витков провода марки ПЭВ-2 диаметром 0,2 мм. Вторичная обмотка трансформатора подключена согласно схеме рис. 5.15, а к переключателю вида внешних характеристик *S1* (ППК-3П6Н-8-А). В положениях 2 и 3 переключателя *S1* вторичная обмотка трансформатора обратной связи по току подключена к контактам *X3:14* и *X3:15* разъема блока элементов 8ДЯ.577.201 и далее к входным выводам выпрямительного моста цепи обратной связи. В положении 1 переключателя *S1* на контакты *X3:14* и *X3:15* подано напряжение с выходных зажимов трансформатора ТДФЖ-2002, т. е. это положение соответствует сварке на жестких характеристиках. Линейность характеристики управления сварочным током и стабилизация тока относительно колебаний сетевого напряжения обеспечены применением резисторов *R1*, *R2*, *R3* и стабилитрона *VD1*, установленных непосредственно на переключателе *S1* согласно схеме рис. 5.15, б. Потенциометр управления *R18* — штатный, расположен на лицевой панели трансформатора ТДФЖ-2002. Резисторы *R1*, *R2* и *R3* типа МЛТ-0,5 с номиналами соответственно 1,1 кОм, 680 Ом и 2,4 кОм, стабилитрон типа Д814Г. Провода с номерами 40 и 43 должны быть отпаяны от потенциометра *R18* и соединены с выводами подвижных контактов переключателя

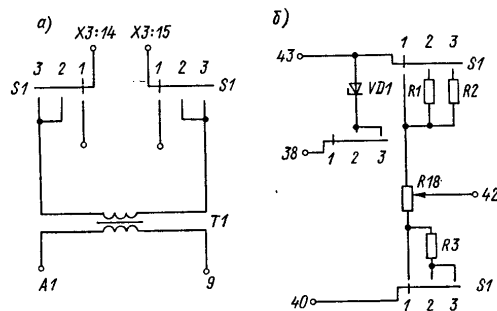


Рис. 5.15. Схема включения разделительного трансформатора (а) и переключателя вида внешних характеристик (б) в трансформаторах ТДФЖ

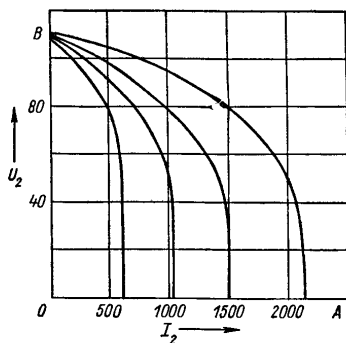


Рис. 5.16. Внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002 после переделки схемы

SI согласно схеме рис. 5.15, б; провод 38 дополнительно соединяется с переключателем. В положении 2 переключателя SI производится сварка в диапазоне токов 600–1200 А, при этом силовой переключатель диапазонов сварочного тока Q2 (см. рис. 5.11) должен быть в положении "малые токи". В положении 3 переключателя SI производится сварка на токах 1100–2200 А, переключатель Q2 – в положении "средние токи".

Крутопадающие внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002, подвергнутого рассмотренной переделке, показаны на рис. 5.16. Отношение тока короткого замыкания к рабочему току в трансформаторах не превышает 1,1. При колебании напряжения питающей сети в пределах от +5 до -10% от номинального значения сварочный ток изменяется не более чем на 2%.

**Автотрансформатор сварочный АТС-01.** Автотрансформатор сварочный АТС-01 предназначен для включения сварочных трансформаторов по двухфазной симметричной схеме (схеме Скотта). Такое включе-

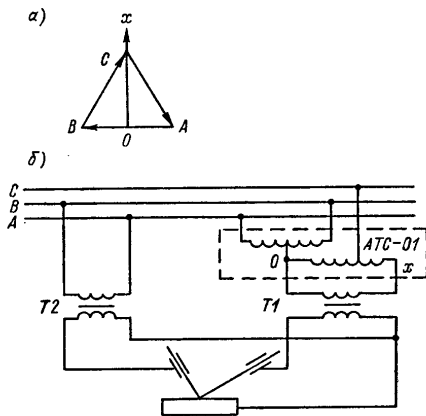


Рис. 5.17. Диаграмма напряжений на зажимах подключения автотрансформатора АТС-01 (а) и схема двухдуговой сварки с применением АТС-01 (б)

ние позволяет при питании мощных однофазных трансформаторов ТДФЖ-2002 обеспечить равномерную загрузку трехфазной сети, а также получить при двух- и трехдуговой сварке фазовый сдвиг между токами двух дуг 90° эл., что при сварке труб под флюсом дает определенный технологический эффект.

Принцип работы автотрансформатора АТС-01 заключается в следующем. Одно из линейных напряжений питающей сети (например,  $U_{AB}$  на диаграмме рис. 5.17, а) делится на две равные части: напряжение между точкой деления 0 и фазой С по значению равно  $\sqrt{3}/2 \cdot U_{AB}$  и сдвинуто по фазе относительно  $U_{AB}$  на 90° (270°). Это напряжение трансформируется до номинального значения  $U_{0x} = U_{AB}$  и используется для питания сварочного трансформатора T1 (рис. 5.17, б). Трансформатор T2 включается на напряжение  $U_{AB}$ . При таком включении токи вторичных обмоток трансформаторов сдвинуты на 90° эл.

Делитель напряжения в автотрансформаторе АТС-01 и собственно автотрансформатор выполнены на едином трехстержневом магнитопроводе. На одном из крайних стержней расположены катушки делителя напряжения, на другом – катушки автотрансформатора. Средний стержень служит для развязки магнитных потоков делителя и автотрансформатора, сечение его в  $\sqrt{2}$  раза больше сечения крайних стержней.

Конструкция автотрансформатора АТС-01 стационарная, с естественной воздушной вентиляцией. Технические данные автотрансформатора приведены ниже:

Напряжение трехфазной питающей сети, В	380
Напряжение нагрузки, В, не менее	380
Ток нагрузки, А	630
Режим работы, ПВ, %	100
Потребляемый ток, А:	
фаза А	375
фаза В	375
фаза С	750
Масса, кг, не более	700

#### 5.4. СВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ

**Сварочные установки УДГ-301-1 и УДГ-501-1.** Установки предназначены для ручной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитной среде аргона алюминия и его сплавов, могут также применяться в качестве источника питания для автоматической сварки. Установки содержат сварочный трансформатор с подмагничиваемым шунтом, диодно-тиристорное устройство ограничения постоянной составляющей сварочного тока, аппаратуру управления циклом сварки и устройство для заварки кратера сварного шва. Для увеличения радиуса действия установки имеют съемный переносной блок, в котором размещены возбуждатель-стабилизатор дуги, газовый клапан и потенциометр управления сварочным током.

Устройство и принцип действия трансформатора с подмагничиваемым шунтом, узла ограничения постоянной составляющей, струк-

турная схема и циклограмма работы блока управления установки для сварки неплавящимся электродом были подробно рассмотрены в предыдущих параграфах. Как и трансформаторы серии ТДФ, установки УДГ-301-1 и УДГ-501-1 имеют два диапазона регулирования сварочного тока. Смена диапазона производится переключением обмоток силового трансформатора, внутри диапазона ток регулируется плавно за счет подмагничивания шунта. В установке УДГ-301-1 предусмотрена возможность включения последовательно со вторичной обмоткой силового трансформатора дополнительного дросселя, что позволяет получить диапазон малых токов (15–25 А). Установка УДГ-301-1 комплектуется двумя сварочными горелками: малой ГР-4 и средней ГР-6; установка УДГ-501-1 – тремя сварочными горелками: малой, средней и большой ГР-10. Все горелки водоохлаждаемые. Технические данные установок приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Параметры	УДГ-301-1	УДГ-501-1
Номинальный сварочный ток, А	315	500
Номинальная потребляемая мощность, кВ·А	25	40
Номинальный режим работы, ПВ, %	60	
Пределы регулирования сварочного тока, А	15–315	40–500
Диаметр вольфрамовых электродов, мм	0,8–6	2–10
Масса, кг, не более	380	460

**Сварочная установка ТИР-300Д.** Сварочная установка ТИР-300Д [29] предназначена для сварки изделий неплавящимся электродом в среде аргона постоянным и переменным током прямоугольной формы, а также для ручной дуговой сварки электродами с покрытием. Установка обеспечивает сварку сталей и цветных металлов, в том числе алюминия и сплавов на его основе.

Установка состоит из силового трансформатора с нормальным рассеянием  $T1$  (рис. 5.18, а), силового тиристорного моста  $VS1-VS4$  с линейным дросселем  $L1$  в цепи постоянного тока, маломощного дросселя насыщения на магнитопроводах 1 и 2, рабочие обмотки которого разделены на токовые  $W_{1T}$  и  $W_{2T}$  и обмотки напряжения  $W_{1H}$  и  $W_{2H}$ , а в цепь обмоток управления  $W_{1Y}$  и  $W_{2Y}$  включен дроссель подавления четных гармоник тока  $L2$ . Установка оснащена импульсным возбудителем-стабилизатором горения дуги переменного тока, регулятором времени заварки кратера шва, аппаратурой управления, защиты, индикации и охлаждения.

Источник питания установки работает следующим образом. При замыкании цепи нагрузки насыщенному под действием тока управления  $I_y$  состоянию магнитопроводов дросселя насыщения 1 и 2 соответствует режим поочередного включения плеч выпрямительного моста в начале каждого полупериода напряжения питания  $u_{20}$  (рис. 5.18, б). Проис-

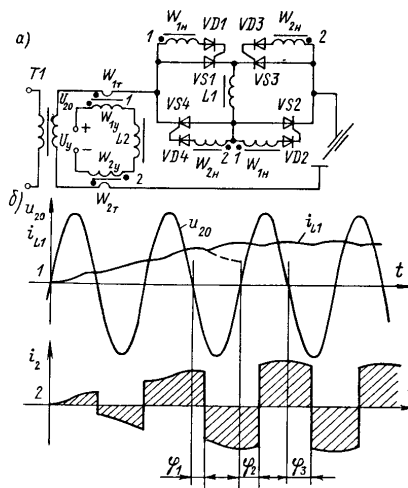


Рис. 5.18. Упрощенная схема (а) и диаграммы токов и напряжения (б) установки ТИР-300Д

ходит увеличение постоянного тока дросселя  $i_{L1}$  и переменного тока нагрузки  $i_2$ . Время нарастания этих токов определяется индуктивностью дросселя  $L1$  и составляет 15–20 периодов напряжения питания. Так как магнитодвижущие силы обмоток управления и токовой на каждом магнитопроводе дросселя насыщения направлены встречно, при достижении током нагрузки значения  $I_{2m} \approx I_{2cp} \approx I_y w_y / w_T$  магнитопровод в интервале управления [10] будет выведен из состояния насыщения. Например, магнитопровод 1 будет выведен из насыщения в интервале (полупериоде), когда отсутствует ток в его обмотках  $W_{1H}$ . При наступлении очередного рабочего интервала (полупериода) [10], когда к обмоткам  $W_{1H}$  будет приложено положительное напряжение, ток через них сможет проходить только после того, как магнитопровод под воздействием этого напряжения вновь будет насыщен. Время, затраченное на перемагничивание магнитопровода, определит время задержки включения очередного тиристора. Включение тиристора будет происходить не в начале полупериода, а с фазовым сдвигом  $\varphi_1 \dots \varphi_3$  (рис. 5.18, б). Значение  $\varphi_3$ , соответствующее установившемуся режиму, зависит от режима нагрузки, т. е. от соотношения величин  $U_D$  и  $U_{20}$ .

При заданном напряжении  $U_y$  или токе управления дроссель насыщения обеспечивает стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения соотношения  $U_D / U_{20}$ . Если под воздействием внешних факторов ток нагрузки уменьшится то уменьшится и степень размагничивания

магнитопровода в интервале управления и, следовательно, время, необходимое для его насыщения в рабочем интервале. Угол  $\varphi$  уменьшится, и ток нагрузки вновь возрастет.

Таким образом, источник питания работает как стабилизатор сварочного тока независимо от того, включена нагрузка в цепь переменного тока, как это показано на рис. 5.18, а, или в цепь постоянного тока последовательно с дросселем *LI*. Большая инерционность сварочного тока источника питания установки ТИР-300Д обеспечивает ей хорошие сварочные свойства, особенно при сварке неплавящимся электродом, отличающейся низкими требованиями к скорости нарастания тока в режиме импульсной сварки. Характер нарастания тока при возбуждении дуги также благоприятен для постепенного разогрева вольфрамового электрода. Прямоугольная форма кривой сварочного тока благоприятно сказывается на стабильности и других технологических параметрах процесса сварки. Из-за постоянства амплитудного значения тока наличие постоянной составляющей тока при сварке алюминиевых сплавов проявляется только в различной длительности полуволн прямой (всегда больше) и обратной полярности, что приводит к повышению проплавления и свариваемости металла и увеличению стойкости вольфрамового электрода. Технологические преимущества, получаемые при сварке током, имеющим асимметричную кривую, компенсируют незначительное увеличение установленной мощности силового трансформатора, вызванное наличием постоянной составляющей в токе нагрузки.

Установка ТИР-300Д выполнена в передвижном исполнении и имеет принудительное воздушное охлаждение. Регулирование тока плавное в пределах каждой из двух ступеней и осуществляется дистанционно с ручного или педального пульта. В диапазоне малых токов две обмотки линейного дросселя соединены последовательно, а токовая обмотка дросселя насыщения имеет два витка; в диапазоне больших токов обмотки линейного дросселя соединены параллельно, токовая обмотка дросселя насыщения образуется одним витком сварочного провода.

Технические данные установки ТИР-300Д приведены ниже:

Напряжение питающей сети, В . . . . .	380
Номинальная потребляемая мощность, кВт·А . . . . .	25
Номинальный режим работы, ПВ, % . . . . .	100
Пределы регулирования сварочного тока, А . . . . .	10–150 40–300
Напряжение холостого хода, В . . . . .	65
Коэффициент полезного действия, % . . . . .	75
Время заварки кратера, с, не менее . . . . .	5
Масса, кг . . . . .	480

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ  
И ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

6.1. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Требования безопасности к конструкции трансформаторов для электродуговой сварки. Конструкции современных сварочных трансформаторов выполняются в строгом соответствии с действующей системой стандартов безопасности труда: ГОСТ 12.2.007.0–75 "Изделия электротехнические. Общие требования безопасности" и ГОСТ 12.2.007.8–75 "Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности". Стандарты устанавливают требования к конструкциям, предотвращающие или уменьшающие до допустимого уровня воздействие на человека электрического тока, шума, ультразвука, вибрации, теплового излучения и других факторов.

*Классы электротехнических изделий по способу защиты человека от поражения электрическим током.* Стандартом установлены пять классов защиты. Сварочные трансформаторы выполняются, как правило, по двум классам – 01 и 1.

К классу 01 относятся изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания.

К классу 1 относятся изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую изоляцию и элемент для заземления. В случае если у изделия есть провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом.

*Требования к заземлению.* Изделия класса защиты 01 и 1 должны быть оборудованы элементом для заземления.

Для присоединения заземляющего проводника на корпусе трансформатора имеется специальный болт с надписью или символом "Земля". Вокруг болта – контактная площадка. Площадка и болт защищены от коррозии и не имеют поверхностной окраски. На видном месте корпусов трансформаторов наносится надпись "Без заземления не включать!".

В сварочных трансформаторах, кроме заземления (зануления) корпусов, предусматривается заземление одного из зажимов вторичной обмотки. Для этой цели в трансформаторах на одном из сварочных зажимов имеется дополнительный элемент для заземления.

*Степень защиты.* Стандартом (ГОСТ 14254–80) устанавливаются требования к системе защиты оболочек (кожухов) изделий. Для обозначения степени защиты применяются две буквы IP (индекс защиты) и две цифры. Значение первой цифры обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением или движущимися

Таблица 6.2

Вторая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от капель воды при наклоне до 15°	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя	Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного действия на изделие

щимися внутри оболочек частями, а также степень защиты изделий от попадания внутрь твердых посторонних тел. Вторая цифра означает степень защиты изделий от попадания воды.

Значение и расшифровка первой цифры приведены в табл. 6.1, второй – в табл. 6.2.

ГОСТ 12.2.007.8–75 устанавливает для источников сварочного тока, работающих в закрытых помещениях, минимальную степень защиты IP11, для работающих на открытом воздухе под навесом – IP21. Практически же все сварочные трансформаторы и установки для ручной дуговой сварки имеют степень защиты IP22, для автоматической – IP21.

Зажимы для подключения трансформаторов к сети должны быть смонтированы отдельно от сварочных зажимов и защищены от случайного прикосновения, например, крышкой, снимаемой при помощи инструмента. Около зажимов наносится надпись или символ "Сеть". Требования по степени защиты не распространяются на сварочные зажимы. Следует отметить, что практически на всех трансформаторах и установках, выпускаемых заводами Минэлектротехпрома СССР, установлены защищенные токовые разъемы для подключения к сварочному контуру и штепсельные разъемы для подключения к сети.

Допустимые значения напряжения холостого хода трансформаторов для дуговой сварки. ГОСТ 12.2.007.8–75 системы стандартов безопасности труда устанавливает предельные эффективные значения напряжения холостого хода, которое не должно превышать 80 В для источников переменного тока для ручной дуговой сварки и 140 В для автоматической сварки.

Устройства для ручной дуговой сварки на переменном токе при работе в особо опасных условиях (внутри металлических емкостей,

на открытом воздухе и др.) должны снабжаться ограничителями напряжения холостого хода.

Устройства для автоматической дуговой сварки при напряжении холостого хода свыше 80 В должны обеспечивать автоматическое отключение напряжения сварочной цепи при холостом ходе не позже чем через 1 с после размыкания сварочной цепи.

Эти требования не распространяются на оборудование, работающее в шахтах, рудниках, под водой и в космосе.

Требования к электрической прочности и сопротивлению изоляции, допустимым значениям уровня шума и вибраций и других воздействий указываются в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.

Вопросы безопасности при эксплуатации трансформаторов для электродуговой сварки. При эксплуатации сварочных трансформаторов необходимо строго выполнять требования ГОСТ 12.3.003–75 "Работы электросварочные. Общие требования безопасности", ПТЭ и ПТБ [25], ПУЭ [26], действующие на предприятии правила и инструкции.

Поражение электрическим током, отравление газами и пылью, ожоги – наиболее характерные виды травматизма при электродуговой сварке.

Меры защиты от поражения электрическим током. Присоединение к сети и отключение от нее сварочных установок, а также наблюдение за их исправным состоянием в процессе эксплуатации должны производиться электротехническим персоналом предприятия. Как правило, эти работы выполняет наладчик электросварочного оборудования, назначенный соответствующим распоряжением. Наладчикам необходимо иметь квалификационную группу по технике безопасности не ниже третьей. Присоединение источников тока (сварочные трансформаторы и установки) к сети (к распределительному щитку) должно осуще-

Таблица 6.1

Первая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от твердых тел размером более 50 мм	Защита от прикосновения к частям внутри оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например руки, от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от твердых тел размером более 12 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 50 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм
3	Защита от твердых тел размером более 2,5 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и других предметов диаметром или толщиной более 2,5 мм и от проникновения твердых тел размером более 2,5 мм

Министерство  
Образования  
Волгограда В.А.

ствляться с использованием коммутационных и защитных аппаратов с разъемными контактными соединениями. Кабельная линия первичной цепи от коммутационного аппарата до источника сварочного тока должна выполняться переносным гибким шланговым кабелем с алюминиевыми или медными жилами, с изоляцией и в оболочке (шланге) из не распространяющей горение резины или пластмассы. Источник сварочного тока должен располагаться на таком расстоянии от коммутационного аппарата, при котором длина соединяющего их гибкого кабеля не превышает 10–15 м.

Схема включения нескольких источников сварочного тока при их работе на одну сварочную дугу должна исключать возможность возникновения между изделием и электродом напряжения, превышающего наибольшее значение напряжения холостого хода одного из источников.

Схема включения нескольких источников сварочного тока при сварке одного изделия должна исключать возможность появления между электродами соседних источников напряжения, превышающего напряжение холостого хода одного из источников.

Источники сварочного тока, как правило, должны располагаться на расстоянии не далее 15 м от сварочного поста. Осуществлять переключения, присоединения или отсоединения в электрических цепях сварочного поста можно только после полного отключения источника от сети коммутационным аппаратом на распределительном щите. При этом следует помнить, что при отключении только выключателя, встроенного в сварочный источник, входные зажимы источника остаются под напряжением.

Не допускается производить ремонт сварочных установок под напряжением. Передвижные источники сварочного тока во время их передвижения необходимо отключать от сети.

Эффективным средством защиты человека от поражения электрическим током является защитное заземление. Заземлению отдельными проводами подлежат корпус трансформатора, зажим сварочной цепи, к которому подключается обратный провод (провод, идущий к изделию), свариваемое изделие или сварочный стол, а также ограничитель напряжения холостого хода, выполненный в виде отдельной приставки.

Особое внимание следует обратить на надежность контактов проводов заземляющего устройства. Следует помнить, что при ненадежном контакте обратного сварочного провода с заземленным изделием сварочный ток может пойти по заземляющему проводнику зажима вторичной цепи и вывести его из строя.

Для заземления должны использоваться гибкие медные или алюминиевые провода; наименьшее сечение медных заземляющих проводов не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ , алюминиевых — не менее  $4 \text{ мм}^2$ .

Последовательное заземление нескольких сварочных установок категорически запрещается.

Следует помнить, что включать трансформатор без заземления недопустимо: при работе трансформатора возможно нарушение изоляции обмоток и в случае отсутствия заземления при касании корпуса

или зажима вторичной обмотки человек может оказаться под напряжением, опасным для жизни.

При работе сварщика должны пользоваться электрододержателями с изолированными токоведущими частями, выполненными по ГОСТ 14651–78.

*Меры защиты от воздействия электрической дуги.* Сварочная дуга является мощным источником световых лучей в широком диапазоне частот — от ультрафиолетовых до инфракрасных. Лучи, излучаемые сварочной дугой, вредно влияют на организм человека, особенно на глаза, вызывая резкую боль и временное ухудшение зрения.

Для защиты глаз и лица сварщик должен пользоваться защитным щитком или маской, снабженными светофильтром. Светофильтры выполняются по ГОСТ 12.4.080–79, имеют различную прозрачность и подбираются в зависимости от значения сварочного тока. Для ручной дуговой сварки металлическим электродом стандарт рекомендует следующие светофильтры: Э1 при токах 30–75 А, Э2 при токах 75–200 А, Э3 при токах 200–400 А, Э4 при токах 400–500 А, Э5 при токах свыше 500 А. С наружной стороны щитка (маски) светофильтр должен быть защищен от брызг расплавленного металла простым прозрачным стеклом. Применять кустарно изготовленные светофильтры запрещается.

При работе в общем помещении с другими работниками сварщик обязан оградить свое рабочее место щитами и предупредить окружающих о вредном влиянии дуги на зрение.

Зачистка швов от шлака должна производиться в очках с простыми стеклами.

Для предохранения от ожогов, брызг расплавленного металла и механических травм сварщик должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты: рукавицами, спецодеждой, обувью, каской, а при выполнении сварочных работ в условиях повышенной опасности — диэлектрическими перчатками, галошами и ковриками.

Для предотвращения поражения дыхательных путей сварщиков парами металлов, газами, пылью должна применяться местная вытяжная вентиляция, которая выполняется по трем основным схемам:

местные отсосы, встроенные в сварочные автоматы, роботы или пристроенные к ним на расстоянии 30–50 мм от дуги и перемещающиеся вместе со сварочной горелкой;

местные отсосы, встроенные в технологическую оснастку; внешние отсосы, не связанные со сварочно-технологическим оборудованием, расположенные на расстоянии 200–500 мм от сварочной дуги.

При отсутствии местных отсосов электросварщика должны применять средства индивидуальной защиты органов дыхания.

Внутри емкостей сварку можно производить только при открытых люках и эффективной приточно-вытяжной вентиляции.

Места сварочных работ должны быть очищены от горючих материалов в радиусе не менее 5 м.



## 6.2. ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Эксплуатация трансформаторов для электродуговой сварки должна производиться в строгом соответствии с нормами техники безопасности и требованиями, изложенными в паспортах на конкретное изделие.

**Подготовка сварочного трансформатора к работе.** Перед первым пуском нового сварочного трансформатора или пуском трансформатора, длительное время не бывшего в употреблении, после расконсервации и очистки от пыли следует проверить мегомметром на 500 В сопротивление изоляции первичного и вторичного контуров относительно корпуса и относительно друг друга.

В тиристорных трансформаторах проверку сопротивления изоляции следует производить при зашунтированных силовых тиристорах. В случае снижения сопротивления изоляции ниже норм, указанных в паспорте на изделие, трансформатор следует просушить теплым воздухом. Затем надо проверить состояние приборов, электрических проводов, контактов, паек и надежно заземлить трансформатор.

Далее необходимо проверить соответствие напряжения сети напряжению, указанному на заводском щитке трансформатора, и соответствие сечения проводов первичному току, указанному на этом щитке.

Провод, идущий к электрододержателю, входит в комплект поставки трансформатора для ручной сварки. Марка и сечение проводов, предназначенных для подключения трансформаторов для автоматической сварки к сварочному автомату, указаны в паспорте на автомат.

Рекомендуемые сечения медных изолированных проводов для подключения к сети наиболее массовых трансформаторов серий ТДМ и ТДФЖ приведены в табл. 6.3.

Сварочные трансформаторы являются однофазной нагрузкой, поэтому при использовании нескольких трансформаторов следует под-

Таблица 6.3

Тип трансформатора	Напряжение сети, В	Первичный ток, А	Сечение провода, мм <sup>2</sup>
ТДМ-317 или ТДМ-317-1	220	97	16
ТДМ-401 или ТДМ-401-1	380	56	10
ТДМ-503 или ТДМ-503-1	220	124	16
	380	73	10
	220	155	25
	380	90	10
ТДМ-503-2 или ТДМ-503-3	380	65	10
ТДФЖ-1002		310	120
ТДФЖ-2002		630	240

ключать их к разным фазам для равномерной загрузки трехфазной сети.

Трансформаторы серии ТДФЖ подключаются к трем фазам сети, при этом, помимо двух силовых проводов, к трансформатору подводится третий слаботочный провод сечением 2,5–4 мм<sup>2</sup> для питания двигателя вентилятора.

Заземление трансформаторов и подключение их к сети следует производить с учетом всех требований, изложенных в § 6.1.

**Выбор режима сварки и порядок работы с трансформаторами серии ТДМ.** Перед включением трансформатора в сеть необходимо поставить переключатель диапазонов тока в положение, соответствующее выбранному режиму сварки. Рукоятку переключателя из одного крайнего положения в другое следует переводить рывком до упора. Необходимо также убедиться, что концы сварочного кабеля не касаются между собой и электрододержатель не касается металлической поверхности свариваемого изделия.

Для ориентировочного выбора сварочного режима в зависимости от толщины свариваемого материала и размера электрода можно пользоваться данными табл. 6.4. Во время работы, руководствуясь собственным опытом или справочными сведениями по производству сварочных работ, сварщик может выбрать значение тока более точно. Плавное регулирование тока осуществляется рукояткой ходового механизма перемещения вторичных подвижных катушек.

При выполнении ручной дуговой сварки на открытом воздухе и в особо опасных условиях или для обеспечения безопасности при смене электродов трансформатор должен снабжаться ограничителем холостого хода, снижающим напряжение холостого хода на выходных зажимах сварочной цепи до значения, не превышающего 12 В, не позже чем через 1 с после погасания сварочной дуги.

Отечественная промышленность выпускает ограничитель холостого хода типа УСНТ-06У2, который навешивается на лицевую панель трансформатора серии ТДМ (см. рис. 5.3). Следует помнить, что применение ограничителя напряжения холостого хода не освобождает от полного

Таблица 6.4

Толщина свариваемого материала, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Толщина свариваемого материала мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
2	2	65–100	8–10	4	160–210
					200–270
3	3	100–120	10–14	5	250–320
					6
4–5	3	100–120	15–20	5	200–270
					6
5–8	4	160–210	15–20	6	250–320
					5
		200–270			320–450



соблюдения всех правил техники безопасности при производстве сварочных работ.

**Выбор режима сварки и порядок работы с трансформаторами серии ТДФЖ. Возможные неисправности.** Перед включением трансформатора в сеть переключением переключателя на панели переключения сварочного тока необходимо установить требуемый диапазон тока и поставить тумблер "Местное или дистанционное регулирование" в требуемое положение.

В трансформаторе ТДФЖ-1002 сигнальная лампа "Сеть" загорается сразу после подачи сетевого напряжения, а в трансформаторе ТДФЖ-2002 – после включения силового автоматического выключателя. Включение двигателя вентилятора производится при включении автоматического выключателя цепей управления и нажатии кнопки "Пуск". Следует обратить внимание на направление охлаждающего воздуха, который должен всасываться со стороны лицевой панели. Если воздух всасывается неправильно, ветровое реле не сработает и не произойдет блокировки кнопки "Пуск". При этом необходимо изменить фазировку питающего напряжения на входных зажимах трансформатора или на двигателе вентилятора, поменяв местами два питающих провода. Включение трансформатора на сварку производится переключателем "Сварка включена".

При необходимости проверки работоспособности трансформатора надо поставить тумблер в положение "Местное регулирование". Постепенно вводя потенциометр для регулирования рабочего напряжения  $R7$  (см. рис. 5.11), надо убедиться по вольтметру в плавном нарастании напряжения холостого хода до максимального значения, которое составляет 110–120 В. Ровное, несильное "гудение" трансформатора начинается с напряжения холостого хода 80–90 В и свидетельствует о его нормальной работе.

При отсутствии напряжения холостого хода или при повышенном "гудении" трансформатора при вводе потенциометра  $R7$  необходимо отключить трансформатор от сети, снять слаботочный провод питания вентилятора, отключить двигатель вентилятора. Затем надо подключить трансформатор к сети двумя силовыми проводами, включить автоматические выключатели.

При отсутствии напряжения холостого хода следует проконтролировать напряжения на вторичных обмотках трансформатора  $T2$ , на задающем потенциометре  $R7$  и на резисторах  $R13$  и  $R14$  цепей управления силовыми тиристорами. Наличие плавно управляемого напряжения на резисторах  $R13$  и  $R14$  свидетельствует о нормальной работе схемы фазового управления; для устранения неисправности надо поменять местами провода, подключенные к первичной обмотке трансформатора  $T2$ .

Повышенное "гудение" трансформатора при вводе потенциометра  $R7$  свидетельствует о том, что работает только один из силовых тиристор. При этом трансформатор оказывается включенным на питание постоянным током и происходит резкое нарастание намагничивающего

тока в его первичной обмотке. Необходимо определить, какой из тиристор не включается, для чего следует поочередно разрывать цепь управления тиристорами  $VS1$  и  $VS2$ , например отпаяв резистор  $R13$ , а затем  $R14$ . Если в цепи управления неработающего тиристора обрыва не обнаружено, надо изменить фазу обмотки питания цепи управления данного тиристора (обмотка  $T2.4$  или  $T2.5$ ), поменяв местами провода, подключенные к обмотке, или изменить полярность управляющего импульса на силовом тиристоре. "Плюс" управляющего импульса должен быть подключен к управляющему электроду тиристора, а "минус" – к катоду. Необходимо помнить, что силовые тиристоры, резисторы  $R13$ ,  $R14$  и обмотки  $T2.4$  и  $T2.5$  трансформатора  $T2$  находятся под напряжением сети.

После устранения неисправностей и проверки работы трансформатора на холостом ходу возможно провести дальнейшую проверку его работоспособности. Для этого следует отключить трансформатор выключателем, замкнуть накоротко его выходные зажимы проводом достаточно большого сечения (120 или 185 мм<sup>2</sup>). Включить трансформатор, предварительно установив ручку потенциометра  $R7$  в положение, соответствующее минимальному рабочему напряжению. Проверить, не допуская перегрева закорачивающего провода, регулирование сварочного тока, работу амперметра на лицевой панели трансформатора. Отключить трансформатор от сети, замкнуть накоротко тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  проводом сечения не менее 10 мм<sup>2</sup>, поставить выключатель  $K1$  "Сварка" в положение "Выключено". Подключить трансформатор к сети. При этом при подаче питающего напряжения автоматический выключатель  $Q1$  должен отключить трансформатор от сети.

Исправный трансформатор можно подключить к сварочному автомату. Работу по настройке автомата необходимо производить при выключенной кнопке "Сварка", установленной на сварочном автомате, при дистанционном управлении или выключенном переключателе "Сварка" на лицевой панели трансформатора при местном управлении.

При выборе диапазона сварочного тока следует использовать наименьший диапазон, обеспечивающий заданный режим сварки. Ниже приведены примеры правильного выбора диапазона.

**Пример 6.1.** Режим сварки:  $I_d = 750$  А;  $U_d = 36$  В. Нормальный процесс сварки обеспечивают оба диапазона токов трансформатора ТДФЖ-1002, однако следует выбрать диапазон малых токов, обеспечивающий меньший коэффициент формы тока (меньшее отклонение формы сварочного тока от синусоидальной).

**Пример 6.2.** Режим сварки:  $I_d = 1800$  А;  $U_d = 55$  В. Выбираем диапазон средних токов трансформатора ТДФЖ-2002. При больших падениях напряжения в сварочных проводах и пониженном напряжении питающей сети, не позволяющих уверенно поддерживать требуемое значение дугового напряжения, следует переключить трансформатор на диапазон больших токов.

**Техническое обслуживание. Планово-предупредительный ремонт.** Для обеспечения бесперебойной и длительной работы трансформатора необходимо производить ежедневные и периодические осмотры.

При ежедневном обслуживании необходимо проверить заземление, надежность крепления контактов проводов, вращение вентилятора. При периодическом обслуживании один раз в месяц следует очистить трансформатор от пыли и грязи, проверить состояние электрических контактов и паек.

Один раз в три месяца проверить состояние аппаратуры управления, сопротивление изоляции. Очистить контакты и изоляционные части переключателя диапазонов токов от медной пыли и налета, смазать контакты тугоплавкой смазкой ЦИАТИМ-201. Смазать смазкой УТ-1 все трущиеся части ходового винта, переключателя, магнитопровода, плоских пружин подвижных катушек, посадочных поверхностей осей колес трансформаторов серии ТДМ.

Проверить состояние конденсаторов фильтра защиты от радиопомех, наружным осмотром установить отсутствие механических повреждений конденсаторов, в случае присоединения новых конденсаторов взамен вышедших из строя зачистить места контактов, тщательно затянуть винтовые соединения.

Система планово-предупредительного ремонта предусматривает ряд работ с работами по техническому обслуживанию ремонту сварочных трансформаторов по заранее составленному плану. Определяются виды работ и составляется их описание, планируются профилактические осмотры и выполнение мелкого, среднего и капитального ремонта, предусматривается снабжение готовыми деталями и комплектующими, изготовление запасных деталей, их учет и хранение. Сроки текущих и капитальных ремонтов устанавливаются с учетом условий эксплуатации и указаний завода-изготовителя трансформатора.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА С ПОДВИЖНЫМИ ОБМОТКАМИ НА ТОК 400 А ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Схема трансформатора приведена на рис. 2.6, б.

Регулирование тока плавно-ступенчатое в двух диапазонах.

Как показано в главе второй, за счет плавно-ступенчатого регулирования существенно снижаются масса и габариты трансформатора при сохранении широких пределов регулирования тока. В диапазоне больших токов катушки первичной и вторичной обмоток соединены параллельно, в диапазоне малых токов – последовательно с отключением части витков первичной обмотки для повышения напряжения холостого хода и, следовательно, стабильности горения дуги при сварке на малых токах.

Расчет ведется по формулам, приведенным на стр. 30–35.

1. Исходные данные для расчета. Номинальный сварочный ток  $I_{2\text{ном}} = 400$  А. Продолжительность нагрузки ПН = 60%. Первичное напряжение  $U_1 = 380$  В. Напряжение холостого хода: в диапазоне больших токов  $U_{20} = 64$  В; в диапазоне малых токов  $U'_{20} = 80$  В. Номинальное рабочее напряжение  $U_{2\text{ном}} = 36$  В. Пределы регулирования сварочного тока: общие 80–460 А; в диапазоне больших токов 200–460 А; в диапазоне малых токов 80–200 А. Класс изоляции Н. Обмоточные провода: для первичной обмотки – алюминиевый провод марки АПСД (по отраслевым техническим условиям); для вторичной обмотки – шина алюминиевая марки АДЮ (ГОСТ 15176–84).

2. Минимальное индуктивное сопротивление, обеспечивающее получение максимального сварочного тока  $I_{22} = 460$  А:

$$x_{\text{min}} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{22}^2}}{I_{22}} = \frac{\sqrt{64^2 - 38,4^2}}{460} = 0,111 \text{ Ом,}$$

где  $U_{22} = 20 + 0,04I_{22} = 20 + 0,04 \cdot 460 = 38,4$  В.

3. Выбор числа витков обмоток. Для выбора числа витков обмоток рекомендуется пользоваться эмпирической формулой  $e_w = 0,55 + 0,095P_{\text{дл}}$ , где  $P_{\text{дл}}$  – мощность трансформатора в киловольт-амперах:

$$\begin{aligned} P_{\text{дл}} &= U_{20} I_{2\text{ном}} \sqrt{\text{ПН}/100} \cdot 10^{-3} = \\ &= 64 \cdot 400 \sqrt{60/100} \cdot 10^{-3} = 19,84 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \\ e_w &= 0,55 + 0,095 \cdot 19,84 = 2,43 \text{ В/виток.} \end{aligned}$$

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = U_1 / e_w = 380 / 2,43 = 156 \text{ витков;}$$

для удобства конструирования катушки примем  $w_1 = 154$  витка.

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = U_{20} / e_w = 64 / 2,43 = 26 \text{ витков.}$$

4. Число витков катушек. Первичная и вторичная обмотки состоят из двух катушек, соединенных на диапазоне больших токов параллельно; следовательно,

$$w_{1\text{к}} = w_1 = 154; \quad w_{2\text{к}} = w_2 = 26.$$

5. Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1\text{ном}} = I_{2\text{ном}} K_{\mu} / n = 400 \cdot 1,05 / 5,92 = 71 \text{ А,}$$

где  $n = w_1 / w_2 = 154 / 26 = 5,92$ .

6. Сечение магнитопровода

$$S_c = U_{20} \cdot 10^4 / (4,44 f w_2 B_m) = 64 \cdot 10^4 / (4,44 \cdot 50 \cdot 26 \cdot 1,73) = 64 \text{ см}^2,$$

где  $f = 50$  Гц – частота сети;  $B_m = 1,73$  Тл – принятая индукция в магнитопроводе.

7. Ширина пластины магнитопровода

$$a = \sqrt{S_c \cdot 10^2 / (p_1 k_c)} = \sqrt{64 \cdot 10^2 / (2,02 \cdot 0,97)} = 57 \text{ мм.}$$

Принимаем  $p_1 = 2,02$ ;  $k_c = 0,97$ .

8. Набор пакета магнитопровода

$$b = p_1 a = 2,02 \cdot 57 = 115 \text{ мм.}$$

9. Ширина окна магнитопровода

$$c_{\text{ок}} = b / p_2 = 115 / 1,08 = 106 \text{ мм.}$$

10. Сечения обмоточных проводов (для параллельного соединения катушек):

$$q_1 = I_{1\text{ном}} / (2J_1) = 71 / (2 \cdot 2,4) = 14,6 \text{ мм}^2;$$

выбирается стандартный провод марки АПСД с размерами  $2,8 \times 5,3 = 14,3 \text{ мм}^2$ ; размер провода в изоляции  $3,25 \times 5,68$ .

11. Размеры катушки первичной обмотки:

ширина катушки

$$m_{1\text{к}} = (c_{\text{ок}} - 2\delta_1 - \delta_2) / 2 = (106 - 2 \cdot 10 - 2) / 2 = 42 \text{ мм;}$$

число слоев в катушке

$$n_{1\text{сл}} = m_{1\text{к}} / [(a'_{1\text{п}} + k_{\text{н}}) k_y] = 42 / [(3,25 + 0,15) \cdot 1,1] = 11;$$

число витков в слое  $w_{1\text{сл}} = w_{1\text{к}} / n_{1\text{сл}} = 154 / 11 = 14$ .

Каналы охлаждения:  $\delta_2 = 13$  мм после 4-го и 8-го слоев.

Высота катушки

$$h_1 = w_{1\text{сл}} b'_{1\text{п}} k_y = 14 \cdot 5,68 \cdot 1,1 = 88 \text{ мм.}$$

12. Размеры катушек вторичной обмотки. Вторичная катушка наматывается алюминиевой шиной марки АДО "на ребро" с целью уменьшения добавочных потерь с радиусом закругления  $R = 35$  мм. Витки катушки изолируются стеклотентой марки ЛЭС (ГОСТ 5937-81) путем их обмотки в полуперекрышу. Сечение шины  $q_2 = I_{2\text{ном}} / (2J_2) = 400 / (2 \cdot 2,1) = 95 \text{ мм}^2$ .

По ГОСТ 15176-84 выбираем шину с размерами  $3,8 \times 25$ ; размеры шины в изоляции  $4,6 \times 25,8$ .

Высота вторичной катушки

$$h_2 = w_{2\text{к}} b'_{2\text{п}} k_y = 26 \cdot 4,6 \cdot 1,1 = 132 \text{ мм.}$$

Катушки трансформатора пропитываются кремнийорганическим лаком КО-916К.

13. С учетом выбранных геометрических размеров произведем поверочный расчет минимального индуктивного сопротивления рассеяния.

Минимальное сопротивление рассеяния соответствует полностью сближенным первичным и вторичным обмоткам ( $\xi = 20$  мм):

$$x_{\text{ок}} = \frac{1}{3} \omega \mu_0 w_2^2 \lambda (h_1 + h_2) = \frac{1}{3} \cdot 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 26^2 \cdot 2,8 \times \\ \times (88 + 132) \cdot 10^{-3} = 0,0547 \text{ Ом,}$$

где

$$\lambda = 1,5 + 1,2 \frac{b}{c_{\text{ок}}} = 1,5 + 1,2 \frac{115}{106} = 2,8; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$$

$$x_{\text{л}} = \frac{1}{2\pi} \omega \mu_0 w_2^2 I_{\text{л}} \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 26^2 \times \\ \times 0,56 \ln \frac{0,109^2}{0,055 \cdot 0,047} = 0,036 \text{ Ом,}$$

где

$$I_{\text{л}} = (I_{1\text{ср}} + I_{2\text{ср}}) / 2 = (0,59 + 0,53) / 2 = 0,56 \text{ м;}$$

$I_{1\text{ср}}, I_{2\text{ср}}$  – средняя длина витка катушек первичной и вторичной обмоток, определяемая по эскизным чертежам;

$$g_1 = 0,223 (2c_1 + h_1) = 0,223 (2 \cdot 80 + 88) \cdot 10^{-3} = 0,055 \text{ м;}$$

$$g_2 = 0,223 (2c_2 + h_2) = 0,223 (2 \cdot 40 + 132) \cdot 10^{-3} = 0,047 \text{ м;}$$

$$g_{12} = 2c_{\text{ср}} [0,22 + 0,75 h_{\text{ср}} / (2c_{\text{ср}})] = 2 \cdot 60 [0,22 + 0,75 \cdot 110 / (2 \cdot 60)] \times \\ \times 10^{-3} = 0,109 \text{ м;}$$

$$c_{\text{ср}} = (c_1 + c_2) / 2 = (40 + 80) / 2 = 60 \text{ мм;}$$

$$h_{\text{ср}} = (h_1 + h_2) / 2 = (88 + 132) / 2 = 110 \text{ мм;}$$

$$x_{\xi} = \omega \mu_0 w_2^2 \lambda \xi = 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 26^2 \cdot 2,8 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,0149 \text{ Ом;}$$

$$\Sigma x = x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi} = 0,0547 + 0,036 + 0,0149 = 0,106 \text{ Ом;}$$

$$\Sigma x < x_{\text{мин}},$$

что обеспечивает получение максимального тока.

14. Определим максимальное индуктивное сопротивление рассеяния для диапазона больших токов, необходимое для получения тока  $I_2 = 200$  А, и высоту окна магнитопровода:

$$x_{\text{max}} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{21}^2}}{I_{21}} = \frac{\sqrt{64^2 - 28^2}}{200} = 0,288 \text{ Ом,}$$

где  $U_{21} = 20 + 0,04 \cdot 200 = 28$  В.

Находим максимальное расстояние между катушками  $\xi_{\text{max}}$ , исходя из условия

$$\xi_{\text{max}} = \frac{x_{\text{max}} - (x_{\text{ок}} + x_{\text{л}})}{\omega \mu_0 w_2^2 \lambda} = \frac{0,288 - (0,0547 + 0,036)}{314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 26^2 \cdot 2,8} = 0,263 \text{ м.}$$

Высота окна магнитопровода

$$h_{\text{ок}} = \delta_4 + h_1 + \xi + h_2 + \delta_7 = 10 + 88 + 263 + 132 + 13 = 506 \text{ мм.}$$

15. Определим максимальное индуктивное сопротивление для диапазона малых токов (последовательное соединение катушек с частичным отключением первичных витков для получения напряжения холостого хода 80 В):

$$x_{\text{ок}} = \frac{1}{3} \omega \mu_0 w_2^2 \lambda (h_1 + h_2) = \frac{1}{3} \cdot 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 52^2 \cdot 2,8 \times$$

$$\times (88 + 132) \cdot 10^{-3} = 0,219 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{л}} = \frac{1}{2\pi} \omega \mu_0 w_2^2 l_{\text{л}} \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \times$$

$$\times 0,56 \cdot 52^2 \ln \frac{0,109^2}{0,055 \cdot 0,047} = 0,144 \text{ Ом};$$

$$x_{\xi} = \omega \mu_0 w_2^2 \lambda \xi_{\text{max}} = 314 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 52^2 \cdot 2,8 \cdot 0,263 = 0,785 \text{ Ом};$$

$$\Sigma x_{\text{max}} = x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi} = 0,219 + 0,144 + 0,785 = 1,15 \text{ Ом}.$$

16. Определим минимальный ток:

$$I_2 \text{ min} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{21}^2}}{\Sigma x_{\text{max}}} = 67 \text{ А}.$$

Окончательные геометрические размеры корректируются после испытания опытного образца.

Полный тепловой расчет выполняется по известным методикам расчета силовых трансформаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 169719 СССР. Сварочный трансформатор / А. А. Печенин // Открытия. Изобретения. 1965. № 7.
2. А. с. 210987 СССР. Сварочный трансформатор / С. М. Тазьба, А. А. Печенин // Открытия. Изобретения. 1968. № 7.
3. А. с. 276289 СССР. Устройство для дуговой сварки на переменном токе / С. М. Белинский, Б. А. Каганский // Открытия. Изобретения. 1970. № 23.
4. А. с. 346052 СССР. Источник питания для дуговой сварки / С. М. Белинский, Б. А. Каганский и др. // Открытия. Изобретения. 1972. № 23.
5. А. с. 707712 СССР. Источник питания для электродуговой сварки / Ю. Н. Горлов, М. И. Закс, Б. А. Каганский и др. // Открытия. Изобретения. 1980. № 1.
6. А. с. 925571 СССР. Источник питания для дуговой сварки / Б. А. Каганский, В. П. Рожков, Е. А. Воронина // Открытия. Изобретения. 1982. № 17.
7. Бамдас А. М., Шапиро С. В. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием. М.: Энергия, 1965.
8. Белинский С. М., Каганский Б. А., Темкин Б. Я. Оборудование для сварки неплавящимся электродом. Л.: Энергия, 1975.
9. Браткова О. Н. Источники питания сварочной дуги. М.: Высшая школа, 1982.
10. Закс М. И. Сварочные выпрямители. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
11. Закс М. И., Липидус Ш. И. Конструкции и элементы расчета подмагничивающего трансформатора для электродуговой сварки // Автоматическая сварка. 1965. № 9. С. 34–38.
12. Закс М. И., Рывкин А. Л. Модернизация сварочного выпрямителя ВДУ-504 // Электротехническая пром-сть. Сер. Электросварка. 1979. Вып. 2 (53). С. 7–11.
13. Заруба Н. И., Дыменко В. В. Стабилизаторы горения дуги переменного тока с двойным управлением // Автоматическая сварка. 1982. № 5. С. 39–42.
14. Иванов Г. П., Рожанский З. Е., Сердюк Н. А. Тиристорные регуляторы тока сварочных трансформаторов // Автоматическая сварка. 1973. № 11. С. 65–69.
15. Иванчук Б. Н., Липман Р. А., Рувинов Б. Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. М.: Энергия, 1968.
16. Каганский Б. А., Закс М. И., Воронина Е. А. Ограничение постоянной составляющей сварочного тока при фазовом и амплитудном регулировании // Автоматическая сварка. 1982. № 5. С. 39–42.
17. Каганский Б. А., Рожков В. П., Воронина Е. А. Испытания тиристорного трансформатора для ручной сварки на 300 А // Электротехническая пром-сть. Сер. Электросварка. 1979. Вып. 6. С. 9.
18. Липидус Ш. И., Закс М. И. К расчету сварочных трансформаторов с маг-

нитным шунтом при неполном разнесении обмоток // *Электротехника*. 1964. № 11. С. 49–52.

19. Лесков Г. И. Исследование процесса в дуге и источниках питания при переходе тока через нуль // *Автоматическая сварка*. 1963. № 2. С. 43–51.

20. Никитин В. П. Основы теории трансформаторов и генераторов для дуговой сварки. М.: Изд-во АН СССР, 1956.

21. Новая серия трансформаторов для автоматической сварки под флюсом / Е. А. Воронина, М. И. Закс, Б. А. Каганский, В. П. Рожков // *Электротехника*, 1982. № 5. С. 13–16.

22. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. М.: Машиностроение, 1966.

23. Петров Г. Н. Электрические машины. Т. 1. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.

24. Печенин А. А. К вопросу выбора рациональной конструкции сварочного трансформатора // Сб. Новое электросварочное оборудование. М.: ГОСИНТИ, 1959. С. 14–28.

25. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 1986.

26. Правила устройства электроустановок. Раздел 7. Гл. 6. М.: Энергоатомиздат, 1985.

27. Рабинович И. Я. Оборудование для дуговой электрической сварки. Источники питания. М.: Машгиз, 1958.

28. Розенблат М. А. Магнитные усилители. М.: Советское радио, 1956.

29. Сварка в машиностроении: Справочник. Т. 4. Гл. 2. М.: Машиностроение, 1979.

30. Сиунов И. С., Бирман У. И., Саламатов Г. П. Влияние формы кривой сварочного тока на формирование шва и свойства сварного соединения при аргодуговой сварке неплавящимся электродом // *Сварочное производство*. 1975. № 4. С. 12–13.

31. Управляемые полупроводниковые вентили: Пер. с англ. / Ф. Джентри, Ф. Гутцвиллер, Н. Голоныяк, Э. фон Застров. М.: Мир, 1967.

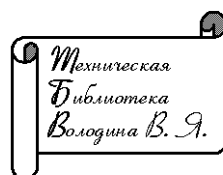
## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. СВАРОЧНАЯ ДУГА И ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА . . .</b>	<b>4</b>
1.1. Особенности горения дуги переменного тока . . . . .	—
1.2. Постоянная составляющая сварочного тока при аргодуговой сварке . . . . .	9
1.3. Общие сведения об источниках тока . . . . .	15
<b>Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ</b>	<b>20</b>
2.1. Элементы теории трансформаторов . . . . .	—
2.2. Общие замечания . . . . .	26
2.3. Трансформаторы с подвижными обмотками . . . . .	27
2.4. Трансформаторы с подвижными магнитными шунтами . . . . .	35
2.5. Трансформаторы с дросселями с воздушным зазором . . . . .	38
<b>Глава 3. ТРАНСФОРМАТОРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ</b>	<b>40</b>
3.1. Магнитное и тиристорное регулирование . . . . .	—
3.2. Источники с прямоугольной формой тока . . . . .	42
3.3. Трансформаторы прерывистого тока . . . . .	45
3.4. Режимы работы тиристоров в фазорегуляторе . . . . .	58
3.5. Системы фазового управления в автоматического регулирования тиристорных трансформаторов . . . . .	62
<b>Глава 4. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1. Импульсные возбудители и стабилизаторы горения дуги . . . . .	—
4.2. Способы и устройства ограничения постоянной составляющей тока . . . . .	76
4.3. Аппаратура управления циклом сварки . . . . .	78
4.4. Ограничители напряжения холостого хода . . . . .	85
4.5. Электрододержатели для ручной дуговой сварки . . . . .	89
	<b>135</b>

Глава 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И УСТАНОВКИ . . . . .	90
5.1. Общие сведения . . . . .	—
5.2. Трансформаторы для ручной дуговой сварки . . . . .	91
5.3. Трансформаторы для автоматической сварки под флюсом . . . . .	106
5.4. Сварочные установки . . . . .	115
Глава 6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ . . . . .	119
6.1. Техника безопасности . . . . .	—
6.2. Вопросы эксплуатации . . . . .	124
Приложение. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА С ПОДВИЖНЫМИ ОБМОТКАМИ НА ТОК 400 А ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ . . . . .	129
Список литературы . . . . .	133

Производственное издание

Закс Михаил Исаакович  
Каганский Борис Абрамович  
Печенин Афанасий Антонович



## ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ

Редактор *Л. М. Пархоменко*  
Художник обложки *Г. В. Смирнов*  
Художественный редактор *Т. Ю. Теплицкая*  
Технические редакторы *А. Г. Рябкина, Н. А. Минеева*  
Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 1443

Подписано в печать с оригинала-макета 26.02.88. М-26191. Формат 60 × 90<sup>1/16</sup>.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл. печ. л.  
8,5. Усл. кр.-отт. 8,75. Уч.-изд. л. 9,86. Тираж 36000 экз. Заказ 953. Цена 55 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение.  
191065 Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения „Техническая книга” имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
198052 Ленинград, Измайловский пр., 29.